



SPECIALIZED MAPPING OF CRUSTAL FAULT ZONES. PART 1: BASIC THEORETICAL CONCEPTS AND PRINCIPLES

K. Zh. Seminsky

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: Long-term studies of shear zones have included collection of data on fractures showing no indication of displacement which are termed as 'blank' fractures. A method aimed at mapping fault structures and stress fields has been developed on the basis of results of paragenetic analysis of measurements of abundant fractures. The method is termed as 'specialized mapping', firstly, due to its specific structural goal so that to distinguish it from the conventional geological mapping of regions in nature, and, secondly, because of the specific procedure applied to refer to fractures as references to decipher fault-block patterns of natural regions. In Part 1, basic theoretical concepts and principles of specialized mapping are described. Part 2 is being prepared for publication in one of the next issues of the journal; it will cover stages of the proposed method and describe some of the cases of its application.

In terms of general organizational principles, specialized mapping is similar to other methods based on structural paragenetic analysis and differs from such methods in types of parageneses viewed as references to reveal crustal fault zones. Such parageneses result from stage-by-stage faulting (Fig 2 and Fig. 7) during which stress fields of the 2nd order are regularly changeable within the shear zone. According to combined experimental and natural data, a complete paragenesis of fractures in the shear zone includes a major (1st order) fault plane and fractures of other seven types, R , R' , n , n' , t , t' and T (2nd order) (Fig. 4 and Fig 8). At the fracture level, each of them corresponds to a paragenesis including three nearly perpendicular systems of early ruptures (Fig. 1), which are based on two classical patterns of conjugated fractures, one of which is consistent with the position of the fault plane (Fig. 3). Taking into account that strike-slip, reverse and normal faults are similar in terms of mechanics (i.e. they are formed due to shearing), standard patterns of fractures systems for their impact zones are members of the above described paragenesis of faults and fractures, which is spatially oriented in such a way that its position and displacements along Y -shears are correspondent to the right- or left-lateral strike-slip faults and also to normal and reverse faults with different dip angles. Under this approach, it has become possible to construct standard circle diagrams / patterns, each containing a complete set of fracture systems of one of the main types of fault zones (Fig. 6). In the process of specialized mapping, the patterns are compared with diagrams based on mass crustal fracture measurements taken on sites in the regions of studies. This procedure yields local solutions showing a presence of fault zones of specific types and spatial orientations; such solutions are shown as points at the corresponding sites on the schematic map of the territory under study, and points with similar parageneses are then connected by lines so that to outline the boundaries of the revealed fault zones.

Besides construction of a schematic map of a fault structures, specialized mapping provides for identification of stress fields wherein elements of such a fault structure has formed or activated at some stages. With this goal, the identified fault zones are classified by ranks. At the first phase of such analysis, types and orientations of all the initial local solutions are compared with types and orientation of the members of the 'ideal' paragenesis of the 2nd order, which corresponds to a strike-slip, reverse (thrust) or normal fault (Fig. 8). This procedure reveals solutions showing the presence of fault zones varying in types and classified in the higher rank, which correspond to the regional stress field known from the history of the region under study. Such regional solutions are used as a basis for further iterations with reference to 'ideal' fault parageneses, until possibilities to classify the fault zones into the fault networks of some specific types are exhausted. A few (typically, three to four) remaining solutions, showing orientations of the fault zone and the dynamic setting of its formation, are indicative of the lowest (regional or geostructural) level of the process of destruction in the region under study. Their simultaneous development is impossible, and therefore they correspond to different stages of faulting in the territory under study. Indirect (statistical) indicators of frequencies and angle ratios of fault systems and direct (apriory) information are used to determine ages and to reveal evolutionary stages in time. At a final stage of specialized mapping, a reversed procedure provides for construction of schematic maps of fault zones for every main stage of formation of the structure under study. With this goal, faults that occurred or activated in a specified stress field are distinguished from the fault network.

In addition to the paragenesis principle applied to reveal fault zones and the evolution-in-time principle used to reveal stages of structure formation, the method of specialized mapping employs statistical methods of data collection and processing, and its application is consistent and computerized through all the work stages. It provides for solution of problems dealing with 'blank' fracturing with account of seemingly chaotic fracture patterns, local initial observations, uncertainties of age relations, impacts of structural and material inhomogeneities, and long timelines of statistical data collection and processing. In view of the above, specialized mapping can be proposed as one of the most efficient methods of studying the fault structure of the Earth's crust.

Part 2 will describe cases of application of the proposed method to map fault zones and to identify fault types and stress fields varying in ages in the regions of faulting, including areas wherein rocks are poorly outcropped. The main results of application of the proposed method of specialized mapping is schematic maps of fault zones, showing the fault zones that were active at various stages of formation of the structure under study. Such maps can be used as a basis for finding solutions to the main problems of endo- and exogeodynamics as well as for assurance of structural control over mineral deposits associated with faulting.

Key words: fracture, fault zone, stress field, rank, structural mapping, paragenesis of fractures, stages of faulting.

Recommended by K.G. Levi

Citation: Seminsky K.Zh. 2014. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 1: Basic theoretical concepts and principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467. doi:10.5800/GT-2014-5-2-0136.

СПЕЦКАРТИРОВАНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ. СТАТЬЯ 1: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ

К. Ж. Семинский

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: В итоге многолетних исследований сетей «немых» (без видимых смещений) трещин в зонах скалывания получил полную методическую завершенность метод картирования разломной структуры и полей напряжений, базирующийся на парагенетическом анализе массовых замеров повсеместно распространенной трещиноватости. Он назван спецкартированием, во-первых, вследствие его специальной структурной направленности в отличие от традиционного геологического картирования природных регионов и, во-вторых, из-за специфичности подхода с использованием трещин в качестве исходного звена для расшифровки разломно-блоковой структуры природных регионов. Данная статья (№ 1) посвящена теоретическим основам и принципам спецкартирования. Статья № 2 готовится к опубликованию в одном из следующих номеров журнала и будет содержать описание этапов практической реализации метода на конкретных примерах.

Спецкартирование по общим принципам организации подобно другим методам, в основе которых лежит структурно-парагенетический анализ, но отличается от них типами парагенезисов, принимаемых в качестве исходных для выявления разломных зон земной коры. Они представляют результат постадийного разломообразования (рис. 2, 7), в процессе которого в зоне скалывания происходит закономерная смена полей напряжений 2-го порядка. Обобщение экспериментальных и природных данных показало, что полный парагенезис разрывов зоны скалывания разломного типа состоит из магистрального сместителя (разлом 1-го порядка) и семи направлений разломов 2-го порядка: R , R' , n , n' , t , t' и T -типа (рис. 4, 8). Каждому из этих направлений на трещинном уровне соответствует парагенезис из трех примерно перпендикулярных систем опережающих разрывов (рис. 1). Его основу составляют два классических направления сопряженных трещин, одно из которых совпадает с положением разломного сместителя (рис. 3). Поскольку сдвиги, взбросы и сбросы в механическом отношении подобны (формируются при скалывании), эталонные наборы разрывных систем для зон их влияния являются членами представленного выше обобщенного парагенезиса разломов и трещин, ориентированного в пространстве так, чтобы его положение и характер подвижек по Y -сколам соответствовали правому или левому сдвигам, а также сбросам или взбросам с разными углами падения. Подобный подход позволил составить эталонные круговые диаграммы (трафареты), каждая из которых представляет полный набор разрывных систем для всех основных типов разломных зон (рис. 6). Эти трафареты используются в спецкартировании для сопоставления с диаграммами массовых замеров трещин, соответствующих точкам структурных наблюдений на изучаемом участке земной коры. Полученные в результате данной операции локальные решения о присутствии в пункте наблюдения разломной зоны определенного типа и пространственной ориентировки выносятся в соответствующем месте на схему территории, после чего по точкам с однотипными парагенезисами отстраиваются границы разломных зон.

Кроме составленной таким способом схемы разломной структуры спецкартирование дает возможность установить типы полей напряжений, в которых на отдельных этапах формировались или активизировались ее отдельные элементы. Для этого проводится поранговый анализ выделенных разломных зон, на первом этапе которого все первоначально полученные локальные решения сопоставляются по типу и ориентации с членами идеализированного парагенезиса разломов 2-го порядка, соответствующего сдвигу, взбросу (надвику) или сбросу (рис. 8). Выявленные в итоге данной процедуры решения о наличии разнотипных разломных зон более крупного ранга соответствуют региональному уровню поля напряжений, существовавшему в истории развития изучаемого участка земной коры. Эти региональные решения используются в качестве основы для следующей итерации с идеализированными парагенезисами разломов, пока не будет исчерпана возможность объединения разломных зон в рамках сети какого-либо определенного типа. Несколько (обычно 3–4) оставшихся решений об ориентировке разломной зоны и динамической обстановке ее формирования отражают самый низкий (региональный или геоструктурный) уровень процесса дест-

рукции в регионе. Они не могут развиваться в одно время и, таким образом, соответствуют разным этапам разломообразования, проявившимся на изучаемой территории. Эти этапы располагаются в эволюционной последовательности, согласно возрастным оценкам, сделанным по косвенным (статистическая информация о частоте встречаемости и угловых соотношениях разрывных систем) или прямым (априорная информация) признакам. В заключение спецкартирования обратным ходом осуществляется составление схем разломных зон для каждого их главных этапов формирования структуры. Для этого из общей сети выделяются те дизъюнктивы, которые возникли или активизировались в соответствующем поле напряжений.

Парагенетический принцип, применяющийся для выделения на местности разломных зон, и эволюционный принцип, используемый для определения этапности формирования структуры, дополняются при спецкартировании статистическим подходом к сбору и обработке информации, формализованностью и единообразием основных операций метода, а также использованием компьютерных средств на всех этапах работы. Это позволяет успешно решать проблемы, связанные с изучением «немой» трещиноватости (кажущаяся хаотичность, локальность первичных наблюдений, неопределенность возрастных взаимоотношений, влияние структурно-вещественных неоднородностей, времязатратность сбора и обработки статистической информации), что выводит спецкартирование в разряд наиболее эффективных методов исследования разломной структуры земной коры. В следующей статье будет показано, что даже в слабообнаженных регионах реализация метода позволяет откартировать разломные зоны, установить их типы и разновозрастные поля напряжений, в которых происходило разломообразование. Главным итогом спецкартирования являются схемы разломных зон, активных на отдельных этапах формирования структуры и представляющих основу для решения ключевых вопросов эндо- и экзогеодинамики, а также структурного контроля месторождений, связанных с разломами.

Ключевые слова: трещина, разломная зона, поле напряжений, ранг, структурное картирование, парагенезис разрывов, стадийность разломообразования.

1. ВВЕДЕНИЕ

Картирование разломной структуры земной коры представляет основу для решения разнотипных прикладных и теоретических задач и в этом качестве остается одним из наиболее востребованных видов геологических исследований. Несмотря на интенсивно развивающиеся методы дистанционного, геофизического и других разновидностей зондирования земной коры, полевые геолого-структурные наблюдения продолжают считаться главными для прямого документирования тектонической структуры. При этом не все ее элементы в силу комплекса объективных причин являются равноценными в плане информативности и возможности фиксирования в натурных условиях. Так, из разрывов только трещины присутствуют повсеместно, что позволяет для каждого коренного выхода горных пород получать сведения о структуре, которые в стандартном случае сопоставимы по объему и значимости с данными по веществу. Именно поэтому важность исследования трещиноватости горных массивов всегда подчеркивалась в руководствах по структурной геологии и геологическому картированию [Smekhov, 1969; Kumpan, 1978; Mikhailov, 1984; Belousov, 1985].

Вместе с тем, в последние десятилетия XX в. исследования «немой» трещиноватости при картировании разломной структуры и реконструкции полей напряжений стали существенно уступать наблюдениям за разрывами с признаками перемещений на плоскостях (штрихи, борозды скольжения). Проведению широкомасштабных исследований повсеместно распро-

страненной трещиноватости до последнего времени препятствовали большие время- и трудоемкость работ, а также отсутствие таких приемов и способов исследования, которые бы позволяли получать полезную информацию по разломной структуре практически в каждом коренном выходе. С начала текущего века поисковые исследования «немой» трещиноватости интенсифицировались за рубежом в связи с необходимостью разработки более точных способов оценки проницаемости пород, что имеет практическое значение в связи с разведкой месторождений углеводородного сырья. Однако подобного типа детальные исследования, как правило, ограничиваются небольшими участками или даже отдельными обнажениями горных пород [Cello et al., 2000; Schulz, Evans, 2000; Billi et al., 2003; Agosta et al., 2010; Caine et al., 2010; Guerriero et al., 2010]. На современном этапе вследствие прогресса компьютерных технологий и достижений полевой тектонофизики появилась возможность на качественно новом уровне картировать структуру природных регионов, основываясь на анализе «немой» трещиноватости.

В предлагаемой работе представлен формализованный метод картирования разломной структуры и полей напряжений земной коры, базирующийся на парагенетическом анализе массовых замеров повсеместно распространенной трещиноватости и использовании тектонофизических закономерностей формирования разрывных сетей в регионах, испытавших тектоническое воздействие. Метод назван *спецкартированием*, во-первых, вследствие его специальной структурной направленности в отличие от традиционного геологического картирования природных регионов и, во-вторых,

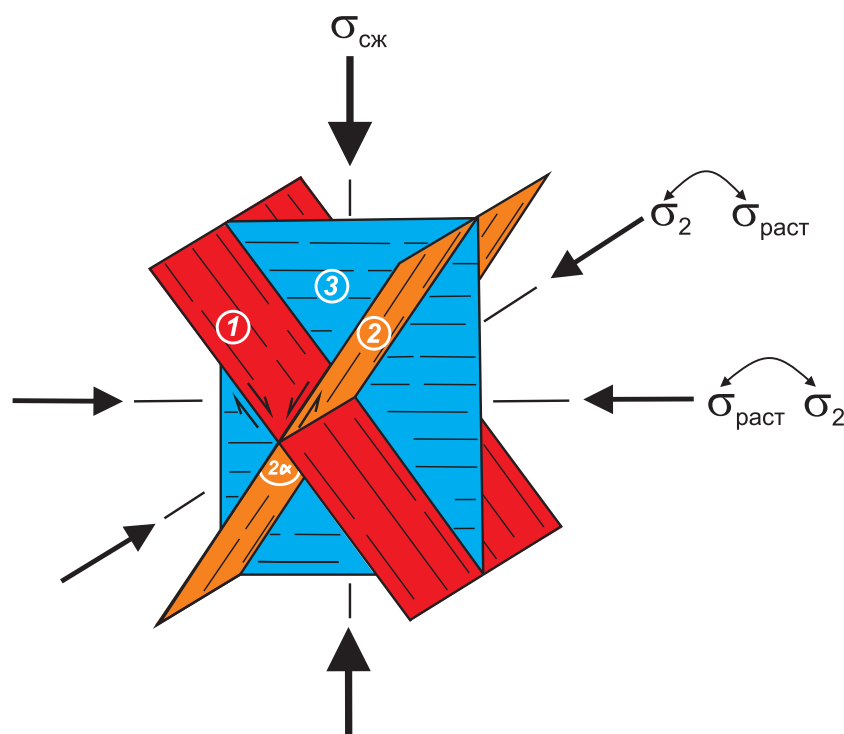


Рис. 1. Парагенезис из трех систем трещин, формирующийся в разломной зоне при переиндексации осей главных нормальных напряжений, которая имеет место в локальном объеме горных пород при осесимметрическом сжатии.

Жирными двусторонними стрелками обозначено направление действия существенно преобладающего по величине главного нормально-го сжимающего напряжения ($\sigma_{сж}$). Тонкие двусторонние стрелки – направление действия близких по величинам промежуточного (σ_2) и наименьшего сжимающего ($\sigma_{раст}$) главных нормальных напряжений, меняющихся местами при переиндексации (дугообразная стрелка). 1–2 – главная (1) и второстепенная (2) системы трещин, представляющие классическую пару сопряженных сколов (односторонние стрелки – направления скольжения); 3 – дополнительная скол-отрывная система трещин, перпендикулярная к системам 1 и 2; α – угол между осью сжатия и системой разрывов скола.

Fig. 1. A paragenesis containing three systems of fractures. It developed in the fault zone in case of re-indexation of axes of main normal stresses, which takes place in a local rock volume under axis-symmetrical compression.

Thick twin arrows show directions of the considerably dominating main normal stress of compression ($\sigma_{сж}$). Thin twin arrows show directions of the transitional (σ_2) and minimal compression ($\sigma_{раст}$) main normal stresses that interchange in case of re-indexation (arc-shaped arrow). 1–2 – main (1) and secondary (2) systems of fractures representing a classical pair of conjugated shear fractures, (arrows show slip directions); 3 – auxiliary shear-detachment system of fractures which is perpendicular to systems 1 and 2; α – angle between the compression axis and the system of shear fractures.

из-за специфичности подхода с использованием трещин в качестве исходного звена для расшифровки разломно-блоковой структуры природных регионов.

Первый вариант спецкартирования в виде достаточно формализованной методики был представлен в двух статьях [Seminsky, 1994, 2005] и базировался на выявлении и анализе площадного распределения троек примерно перпендикулярных систем трещин (рис. 1), которые составляют локальные разрывные сети в разломных зонах, формирующихся при скалывании. Основу трещинного парагенезиса представляют два классических направления сопряженных сколов, используемых в известных российских и зарубежных методиках для восстановления осей главных нормальных напряжений. Третья, нетрадиционно выделяемая, система разрывов перпендикулярна к двум первым и образуется вслед за ними в условиях существенно упру-

того поведения породного массива ввиду переиндексации осей напряжений в процессе разрывообразования. Переиндексация происходит при напряженном состоянии, близком к осесимметрическому, которое имеет место при формировании большинства природных зон скалывания в верхней (но не близповерхностной) части коры. Эффективность использования тройственных парагенезисов в исследовании структуры земной коры доказали результаты применения первого варианта спецкартирования в регионах с разным типом тектонической активности [Sherman et al., 1991, 1992, 1994; Seminsky, 1994, 2003, 2005]. Метод позволил на основе анализа площадного распределения разнотипных троек систем трещин определять местоположение и границы разломных зон, условия их образования (сжатие, растяжение или сдвиг) и некоторые особенности внутреннего строения.

Вместе с тем, опыт спецкартирования потребовал усовершенствования метода в связи с получением дополнительной информации о специфическом строении сетей приразломных трещин. Было установлено, что вблизи крупных разломных сместителей ширина полосы распространения связанного с каждым из них тройственного парагенезиса составляет несколько километров, но трещинные сети, представленные только одним этим главным парагенезисом, встречаются в такой зоне достаточно редко. Трещиноватость большинства коренных выходов имеет знакомый исследователю внешне хаотический вид. Это обусловлено изменением напряженного состояния в массиве, что приводит к наложению трех троек систем трещин и более. Поскольку эволюция разрывов 2-го порядка в зонах скалывания происходит согласно известным тектонофизическим закономерностям, были разработаны идеализированные образцы трещинных сетей в разнотипных разломных зонах земной коры (в виде эталонных круговых диаграмм с полным набором парагенетически связанных систем трещин). Это существенно упростило процедуру обработки наиболее сложных по строению круговых диаграмм трещиноватости с хаотичным распределением многочисленных неконтрастных максимумов за счет их сравнения с эталонами. Кроме того, открылась возможность устанавливать происхождение большинства направлений трещиноватости, составляющих хаотические сети вблизи разломных сместителей.

Важнейшим дополнительным преимуществом подобного анализа, представленного в серии последовавших публикаций [Seminsky et al., 2005; Seminsky, Burzunova, 2007; Burzunova, 2011], является возможность установить поле напряжений и, соответственно, тип зоны скалывания 1-го порядка, в которой происходило формирование трещинной сети конкретного обнажения горных пород. Это позволяет перейти через трещиноватость к структурам разломного ранга с трассированием зон их влияния на местности, определением морфогенетического типа и набора динамических обстановок 2-го порядка. Данная возможность была реализована на примере анализа трещинных сетей в кайнозойских осадках Байкальского рифта и заключалась в разработке формализованных путей перехода от локальных структур и соответствующих им стресс-тензоров к полям напряжений и дизъюнктивам регионального уровня иерархии [Seminsky, Cheremnykh, 2011].

Таким образом, в итоге более чем двадцатилетнего периода исследований закономерностей ориентации и распределения «немых» трещин в зонах действия скалывающих напряжений метод спецкартирования разломной структуры земной коры на основе парагенетического анализа массовых замеров трещиноватости получил полную методическую завершенность. В настоящее время при наличии достаточного количества точек измерения трещин он позволяет откартировать

локальные и региональные разломные зоны, установить их типы и разновозрастные поля напряжений, в которых происходило разломообразование в пределах изучаемого участка земной коры. Для удобства применения метода при выявлении разломной структуры тектонически активных регионов, районов локализации рудных месторождений или участков их разработки мы представляем его в полном объеме в двух последовательных публикациях. Данная статья посвящена теоретическим основам и принципам спецкартирования. Вторая статья готовится к публикации и будет содержать описание этапов практической реализации метода на конкретных примерах.

2. ОСНОВЫ СПЕЦКАРТИРОВАНИЯ

Фактический материал, получаемый в результате измерений повсеместно распространенной «немой» трещиноватости, дает возможность непосредственно в поле или после первичной обработки (построения диаграмм, графиков и пр.) получить информацию о двух главных характеристиках разрывной структуры. Это ориентировка разломов в пространстве и частота их встречаемости, которые при массовых наблюдениях получают численное выражение. Первая из характеристик позволяет посредством парагенетического анализа установить тип разломной зоны и соответствующее ему поле напряжений, а вторая – сделать заключение об интенсивности и длительности воздействия данного поля на изучаемый участок земной коры. Спецкартирование основывается главным образом на анализе параметров, связанных с этими двумя характеристиками, которые рассматриваются ниже в отдельных разделах сразу после описания ключевых понятий и терминов.

2.1. ПОНЯТИЙНАЯ БАЗА

Терминологические основы спецкартирования состоят из комплекса взаимосвязанных понятий, принятых в тектонофизике [Anderson, 1951; Gzovsky, 1963; Stoyanov, 1977; Sherman, 1977; Chernyshev, 1983; Sherman et al., 1983, 1991; Hancock, 1985; Rastsvetaev, 1987; Mandl, 1988; Sylvester, 1988; Luk'yanov, 1991; Nicolas, 1987; Twiss, Moores, 1992; Kearey, 1993; Ruzhich, 1997; Park, 1997; Sibson, 1998], которые частично получили новую смысловую окраску в ходе становления метода [Seminsky, 2003, 2005]. Ключевым является представление об «области динамического влияния разлома», под которой С.И. Шерман, С.А. Борняков и В.Ю. Буддо понимают «...часть окружающего разлом во всех трех измерениях пространства, на котором проявляются остаточные (пластические или разрывные) и упругие следы деформаций, вызванные формированием разлома и подвижками по нему» [Sherman et al., 1983] (с. 9). В свете данного определе-

ния разлом как полоса тектонитов, картируемая при традиционной геологической съемке, составляет по объему небольшую часть рассматриваемой области, которая отличается от вмещающих пород упорядоченной системой дислокаций хрупкого типа. Поскольку не все стороны областей влияния разломов, отмеченные в определении, в одинаковой степени доступны для изучения, мы вслед за геологами-практиками будем использовать термин «зона», подчеркивая тем самым, что в большинстве случаев объектом картирования являлся плоский срез области динамического влияния разлома. Кроме того, за границей наших исследований остаются упругие деформации, что сужает геометрические размеры зоны влияния разлома, но позволяет акцентировать внимание на разрывах как детально развивающихся структурных элементах.

Главным элементом внутренней структуры разломной зоны является магистральный сместитель – разрывное нарушение, единая поверхность которого пересекает деформируемый объем полностью. Это разлом в узком понимании данного термина, являющийся в зоне разрывом 1-го порядка. К разрывам 2-го порядка относятся нарушения, в возникновении и развитии которых определяющее значение играет упомянутый выше структурный элемент более низкого (1-го) порядка. Таким образом, понятие «порядок» в данном случае содержит определенный генетический смысл, тогда как «ранг» – только масштабная характеристика. Ранги разрывов соотносятся с иерархическими уровнями поля напряжений и делимости литосферы, из которых в рассматриваемом аспекте наибольшего внимания заслуживают локальный, региональный и геоструктурный. На этих уровнях функционируют разноранговые трещины, разломы и разломные системы, которые отличаются количественно: поверхности механического разрушения размерами 0.1–100.0 м и/или амплитудой смещения – 0.1–100.0 мм являются трещинами, более крупные разрывные нарушения – разломами, а дизъюнктивные структуры литосферного масштаба – разломными системами. Объединяя порядковые и масштабные характеристики разрывных структур, ограничивающих рассматриваемый при спецкартировании класс разломов, имеет смысл выделять мелкие разломные зоны локального уровня, для которых разрывами 2-го порядка являются трещины, а также крупные региональные разломы, представляющие 2-й порядок в разломной системе.

Внутреннее строение разломной зоны определяется существованием структурного парагенезиса, под которым в данном случае понимается совокупность систем разрывов (2-го порядка), образовавшихся в одной динамической обстановке (поле напряжений 1-го порядка) и составляющих в плане единый линейно вытянутый участок коры. Метод спецкартирования разломных зон по своей сути является структурно-парагенетическим, так как в каждом коренном выходе предметом массовых полевых наблюдений могут быть только

трещины без признаков скольжения. Разрывы со смещениями, как и другие признаки присутствия разломов (разнотипные тектониты), используются для получения уникальной, но (в силу ограниченной распространенности таких признаков) вспомогательной информации. Она может быть получена вследствие применения традиционных способов картирования разломов и кинематических методов реконструкции стресс-тензоров [Gushchenko, 1979; Parfenov, 1984; Ramsay, Huber, 1987; Reches, 1987; Angelier, 1989; Gephart, 1990; Rodygain, 1991; Rebetsky, 2007]. В структурно-парагенетическом подходе к интерпретации полевых данных, взятом за основу для спецкартирования, положения разрывных систем и осей главных нормальных напряжений взаимосвязаны. Это позволяет при описании метода оперировать главным образом парагенезисами, подразумевая, что каждому из них соответствует определенное поле напряжений.

2.2. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗЛОМНЫХ ЗОН

Структурно-парагенетическим методам определения типов разломов и реконструкции напряженного состояния породных массивов посвящена обширная литература [Danilovich, 1961; Burtman et al., 1963; Gzovsky, 1963; Luk'yanov, 1965; Harding, 1974; Bondarenko, 1976; Stoyanov, 1977; Sherman, 1977; Utkin, 1980; Hancock, 1985; Rastsvetaev, 1987; Sylvester, 1988; Cassas et al., 1990; Gibbs, 1990; Sim, 1991; Twiss, Moores, 1992; Kopp, 1997; Ruzhich, 1997; Structural parageneses..., 1997; Trifonov, 1983; 1999; и мн. др.], включая и обобщающие работы [Sylvester, 1984; Gintov, Isai, 1988; Sherman, Dneprovsky, 1989; McClay, 1991; Nikolaev, 1992]. При общности подхода к анализу принципиальные отличия его разновидностей у отдельных авторов связаны главным образом с различием вида парагенезиса, который выделяется на базе опыта исследований той или иной динамической обстановки. Парагенезисы, принятые в качестве исходных для спецкартирования, были выявлены в ходе исследований разломных зон в натурных и экспериментальных условиях [Seminsky, 2003]. Тектонофизические закономерности разломообразования, полученные при этом, представлены ниже и составляют теоретическую основу спецкартирования. Они отражают наиболее общие условия протекания процесса деструкции в верхней коре, что позволяет использовать метод спецкартирования в большинстве природных ситуаций, ориентируясь на массовый сбор фактического материала.

Как и для всех реальных физических тел, поведение любого объема земной коры под нагрузкой, когда он после приобретения остаточной деформации разрушается с образованием разлома, характеризуется как упругопластическое с упрочением и ослаблением (рис. 2). То есть разрушение наступает только в ре-

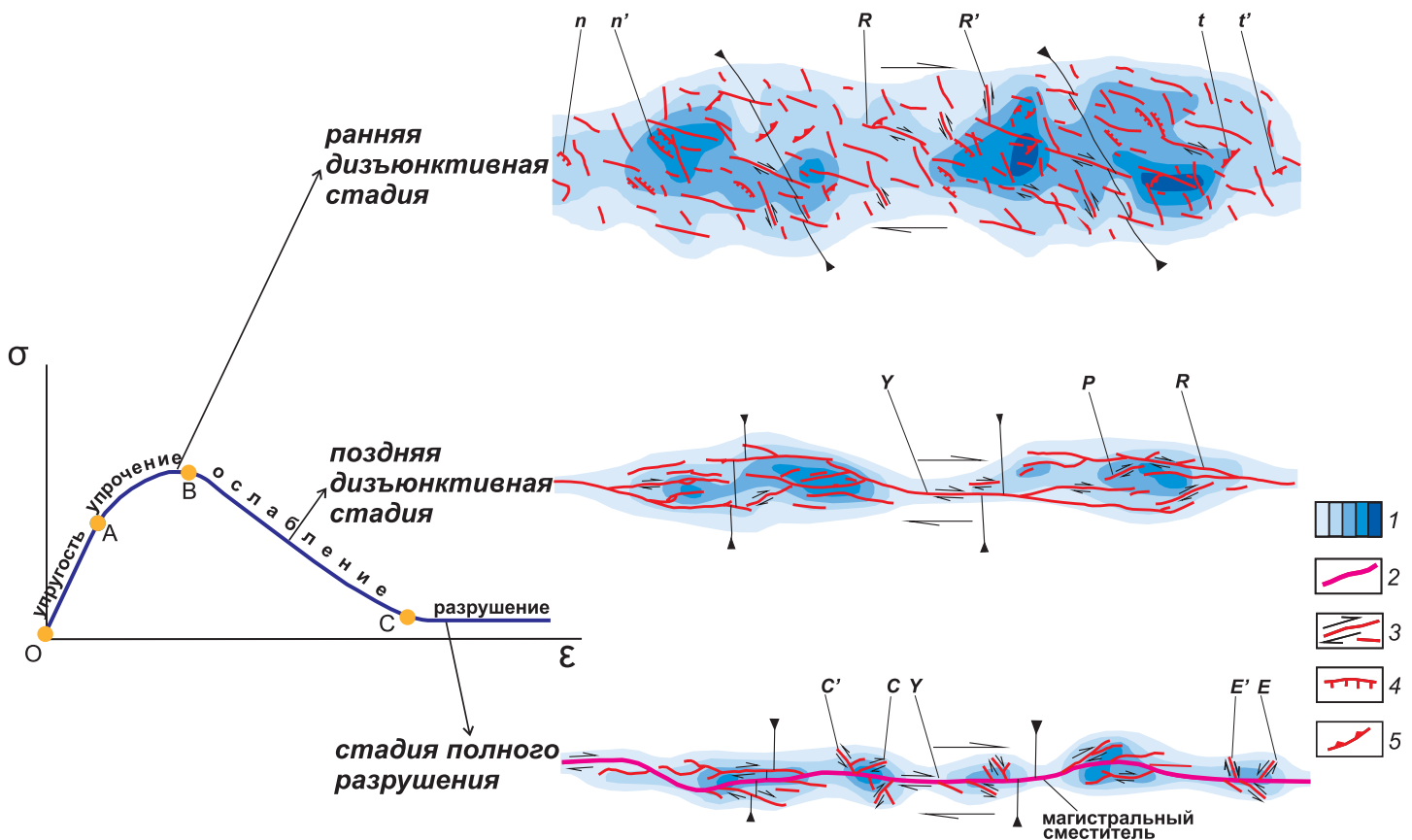


Рис. 2. Принципиальная схема формирования внутренней структуры разломной зоны (на примере правого сдвига).

Главные стадии разрывообразования соответствуют трем характерным отрезкам на кривой «нагрузка (σ) – деформация (ϵ)». Латинскими буквами на схемах показаны разнотипные разрывы 2-го порядка, опережающие (R' , R , n' , n , t' , t , P) и опережающие (на участках сжатия – C' , C и растяжения – E' , E) магистральный сместитель 1-го порядка (Y). 1 – участки с различным количеством разрывов в единице площади; 2 – магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка); 3–5 – сдвиги (3), сбросы (4) и надвиги (5) 2-го порядка.

Fig. 2. The principal scheme of formation of the internal structure of the fault zone (as exemplified by the right-side strike-slip fault).

Main stages of faulting correspond to three segments of the 'load (σ) vs deformation (ϵ)' curve. Latin letters mark various types of fractures of the 2nd order, including early (R' , R , n' , n , t' , t , and P) and feathering (on sites of compression – C' , C , and extension – E' , E), and the main fault of the 1st order (Y). 1 – sites with various quantities of fractures per square unit; 2 – main fault plane (fracture of the 1st order); 3–5 – strike-slip faults (3), normal faults (4) and thrusts (5) of the 2nd order.

результате последовательной смены во времени состояний упругости, упрочения, а затем ослабления, для которого характерна локализация деформации во все более и более узкой зоне. Разрывообразование происходит при упрочении и ослаблении субстрата путем возникновения мелких нарушений, их объединения в разрывы более крупного ранга вплоть до возникновения единого магистрального сместителя, разрушающего весь нагруженный объем. Существует три дизъюнктивных стадии формирования разлома, в течение которых состояние внутренней структуры в зоне его динамического влияния отличается кардинальным образом и отвечает, соответственно, упрочению, ослаблению и разрушению.

На ранней дизъюнктивной стадии имеет место широкая зона сравнительно мелких опережающих раз-

рывов (рис. 2), которую в геологической практике обычно называют зоной повышенной трещиноватости, зоной скрытого разлома и пр. На поздней дизъюнктивной стадии разлом выражен существенно меньшей по размерам зоной распространения активных опережающих разрывов, представленных небольшими фрагментами магистрального сместителя, между которыми имеют место интенсивно нарушенные широкие области их взаимодействия (рис. 2). Разлом на дизъюнктивной стадии полного разрушения в качестве активных разрывов представлен единым магистральным сместителем и крупными опережающими нарушениями, причем разрушение деформируемого объема в данном случае является полным лишь с механической точки зрения, так как два обособленных блока контактируют друг с другом по достаточно мощной

зоне тектонитов (рис. 2). Как следствие, зона полностью сформировавшегося разлома за счет постоянной локализации деформации и наложения структур разных стадий имеет поперечно-зональное строение, в котором по направлению от оси к крыльям происходит смена участков (подзон), соответствующих стадии полного разрушения, ранней и поздней дизъюнктивным стадиям.

Конкретные формы структурообразования в зоне разлома зависят от типа нагружения, скорости деформации, реологических характеристик среды, размеров деформируемого объема. Это, казалось бы, должно обеспечить существование в реальных условиях множества различных парагенезисов, делая структурно-парагенетический анализ малоэффективным. Однако ситуацию упрощает то, что в механическом отношении разломные зоны подобны. Независимо от ориентировки и направления движения блоков деформация субстрата в их пределах происходит по типу скалывания, которое для доминирующих в земной коре условий всестороннего сжатия характеризуется наличием небольшого транспрессивного эффекта. Это с учетом представленной выше стадийности разломообразования определяет состав структурного парагенезиса на качественном уровне. Однако перечисленные в начале абзаца факторы контролируют реологическое поведение субстрата в разломной зоне, что определяет количественные характеристики парагенезиса, включая и угловые соотношения между его элементами. Таким образом, при описании состава парагенезиса разрывов 2-го порядка в разломной зоне как основы спецкартирования вначале он будет рассматриваться для мелких тектонических нарушений, а затем – для более крупных дизъюнктивов.

По сравнению с крупными, мелкие разломы развиваются при менее податливом поведении субстрата. Это приводит к значительному сокращению продолжительности поздней дизъюнктивной стадии развития разломной зоны и существенному упрощению ее внутренней структуры. Она в общем случае представлена лишь системами опережающих трещин, которые развиваются на ранней стадии, а затем частично активизируются на стадии полного разрушения как разрывы, опережающие магистральный сместитель на участках с особыми условиями трения (изгибы и пр.). В зависимости от сложности напряженно-деформированного состояния для разломных зон выделяются парагенезисы из двух (классических) и более систем трещин [Danilovich, 1961; Gzovsky, 1963; Reches, 1978; Rastsvetaev, 1987; Guiraud et al., 1989; Nikolaev, 1992]. Наши целенаправленные исследования в данной области позволили установить, что в горных породах, подвергнутых воздействию внешних сил, наиболее распространен парагенезис из трех примерно перпендикулярных друг другу систем трещин [Seminsky, 1994, 2003], который формируется следующим образом.

В зонах разломов небольшие объемы земной коры,

находящиеся в условиях трехосного сжатия, вначале разрушаются с образованием двух сопряженных систем трещин – опережающих сколов Риделя. По данным массовых целенаправленных измерений, вблизи разломных сместителей среднее значение двугранного угла при оси сжатия для классической пары сопряженных трещин равно примерно 80° , так как в верхней коре угол скалывания (α), составляя в момент их возникновения $\approx 35^\circ$, «пассивно» увеличивается в ходе последующей деформации до 45° и более. После возникновения сколовых систем трещин в условиях характерного для разломных зон транспрессивного скалывания (с боковым сжатием), когда напряженное состояние массива близко к осесимметрическому с примерным равенством абсолютных значений двух главных нормальных напряжений (в данном случае $\sigma_{расп.}$ и σ_2), происходит их переиндексация – изменение величин при сохранении направлений действия (см. рис. 1). Резкое (при существенно упругом поведении горного массива) падение напряжений приводит к формированию в этом новом поле напряжений не двух сколовых, а одной отрывной системы трещин, которая перпендикулярна обоим образовавшимся ранее направлениям сколов. Процесс продолжается в виде циклов, когда накапливающиеся в разломной зоне напряжения частично снимаются за счет подвижек по сети уже возникших трещин. При этом характер перемещений по разрывам третьей системы будет не раздвиговым (как в момент возникновения), а сколовым, так как их ориентация совпадает с направлением транспортировки вещества при подвижках по нарушениям двух первых систем. Двойственная (скол-отрыв) природа третьей системы трещин, которая зачастую подтверждена наличием (иногда у одних и тех же разрывов) вещественного заполнителя и штрихов скольжения, отражает специфику последовательного (стадийного) формирования парагенезиса.

Тройки примерно перпендикулярных систем трещин, образующиеся в наиболее часто встречающемся случае переиндексации осей напряжений, составляют основу разрывной сети в зонах мелких тектонических нарушений, закономерно отличаясь по ориентировке для разломов разного морфогенетического типа (рис. 3). Вблизи сместителей с перемещением крыльев по падению (сбросы, взбросы, надвиги) главная (наибольшей густоты) и второстепенная системы трещин параллельны в плане разлому, но падают в противоположные стороны. У сдвигов это две системы субвертикальных разрывов, одна из которых также совпадает с простиранием разломной зоны. Третья – дополнительная – система трещин у сдвигов субгоризонтальна, а у сбросов (как крутых, так и пологих) и взбросов (надвигов) субвертикальна при поперечном в плане положении к двум первым системам. Таким образом, зоны сдвигов с одной стороны, а зоны взбросов (надвигов) и сбросов – с другой достаточно четко отличаемы друг от друга по общей ориентировке в пространстве трой-

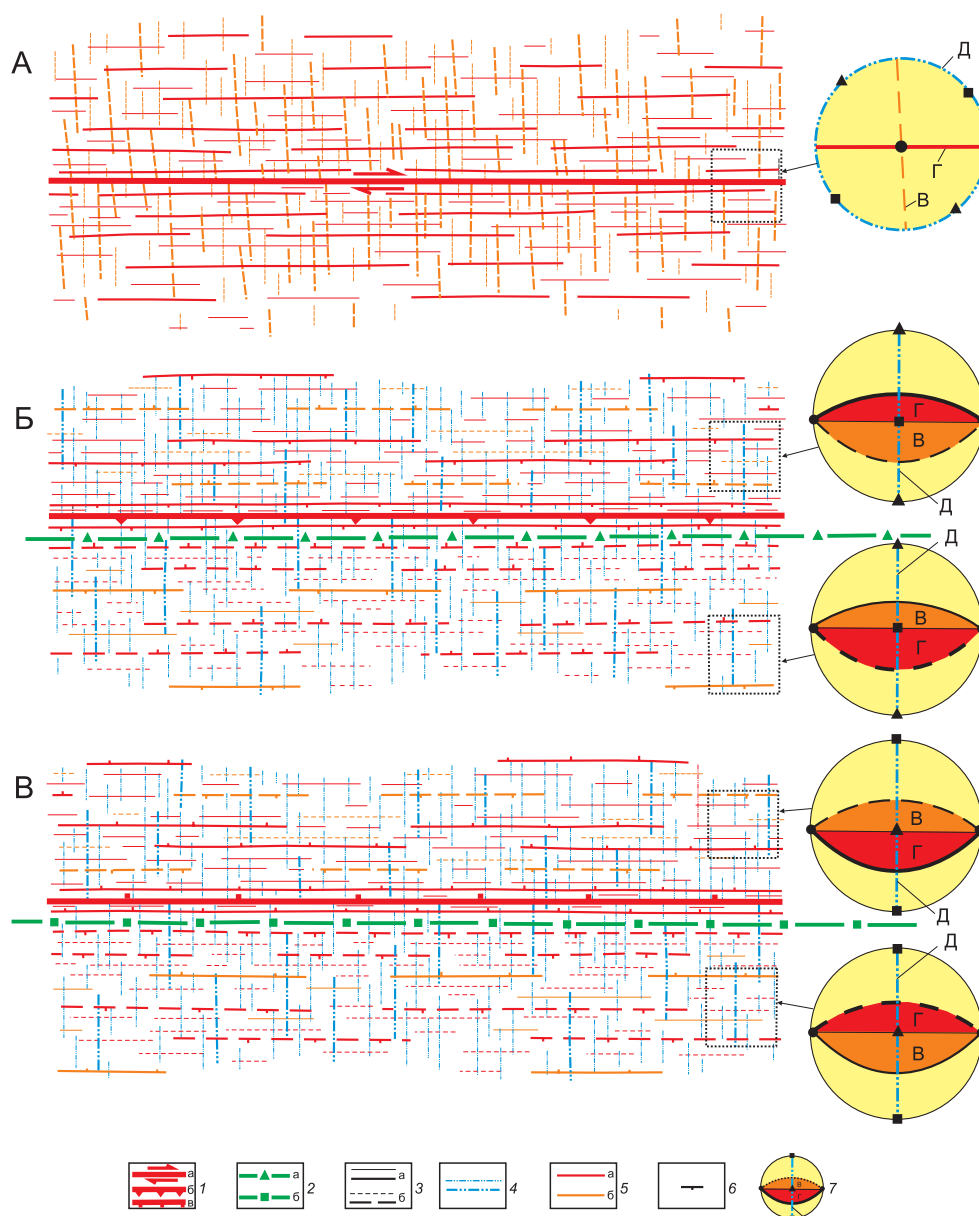


Рис. 3. Принципиальные схемы (план) внутренней структуры небольших правосдвиговой (А), взбросовой (Б) и сбросовой (В) разломных зон, основу каждой из которых составляет парагенезис из трех примерно перпендикулярных друг другу систем трещин.

1 – магистральный сместитель сдвиговой (а), взбросовой (б) или сбросовой (в) разломных зон; 2 – ось, разделяющая подзоны с противоположным падением главной системы трещин тройственного парагенезиса у взбросовой (а) и сбросовой (б) разломных зон; 3 – мелкая или более крупная трещина, принадлежащая к одной (а) или ко второй (б) из двух сопряженных систем трещин скола в тройственном парагенезисе; 4 – мелкая или более крупная трещина, принадлежащая к дополнительной системе тройственного парагенезиса; 5 – системы сколовых трещин, являющиеся в зависимости от интенсивности проявления на площадке наблюдения главной или второстепенной в тройственном парагенезисе; 6 – направление падения у крупных трещин; 7 – круговая диаграмма, на которой для произвольно выбранных участков разломной зоны (оконалированы точками) отражено поле напряжений (квадрат – $\sigma_{рас}$; кружок – σ_2 ; треугольник – $\sigma_{сж}$), а также пространственное положение образовавшегося в нем парагенезиса из трех примерно перпендикулярных систем трещин (Г – главная, В – второстепенная, Д – дополнительная).

Fig. 3. Principal schemes of the internal structure of small-size right-lateral strike-slip (A), reverse (Б) and normal (В) fault zones. Each of them is based on a paragenesis including three systems of fractures which are nearly perpendicular to each other.

1 – main fault plane of strike-slip (a), reverse (б) and normal (в) fault zones; 2 – axis separating sub-zones with opposite strike of the main system of fractures with the triple paragenesis for the reverse (a) and normal (б) fault zones; 3 – small or larger fracture that belongs to one of the systems conjugated shear fractures (a or б) in the triple paragenesis; 4 – small or larger fracture that belongs to an additional system in the triple paragenesis; 5 – systems of shear fractures that function as either the main or secondary systems in the triple paragenesis, depending on intensity of their manifestation on the monitoring site; 6 – dip directions of large fractures; 7 – circle diagram of a randomly chosen site in the fault zone (dots show boundaries) which shows the stress field (box – $\sigma_{рас}$; circle – σ_2 ; triangle – $\sigma_{сж}$), and spatial location of its paragenesis including three systems of fractures which are nearly perpendicular to each other (Г – main, В – secondary, Д – auxiliary).

ственного парагенезиса, составляющего их внутреннюю структуру. Идентификация разломов, формирующихся в условиях сжатия (надвиги, взбросы) и растяжения (сбросы), возможна по зональности внутреннего строения (рис. 3, Б, В). Зоны их влияния разделены в поперечном направлении на две части, характеризующиеся противоположными азимутами падения главной системы трещин тройственного парагенезиса: у разломов, связанных со сжатием, трещины главной системы в разных подзонах «падают» от периферии к центру, а у сбросов – от центра к периферии.

Тройки взаимно ортогональных разрывных систем по встречаемости резко преобладают над другими известными парагенезисами трещин (конусы, пояса, пирамиды и т.д.), условия образования которых специфичны и имеют место в ограниченном круге природных ситуаций. Кроме того, при многоэтапных подвижках в разломной зоне имеет место «механическое» наложение разноориентированных троек с образованием сложных трещинных сетей. Все это дает основание использовать тройственные парагенезисы в качестве первичной основы для парагенетического анализа при спецкартировании, особенностями которого являются массовый характер и единообразие измерений трещин в пределах каждого обнажения горных пород.

При переходе от уровня трещиноватости к разломам меняется характер реологического поведения субстрата в сторону его большей пластичности. Для разломных зон это приводит к усложнению парагенезиса вторичных разрывов, в качестве которых выступают уже не трещины, а мелкие разломы. Это усложнение в какой-то мере связано с увеличением продолжительности поздней дизъюнктивной стадии развития разломной зоны, но в большей степени – со спецификой динамики поля напряжений на ранней стадии, приводящей к увеличению количества систем опережающих разрывов. Так, переиндексация осей напряжений, реализующаяся в зоне при деформации транспрессивного скалывания, приводит к формированию не одной отрывной, а пары сопряженных сколовых систем (рис. 2; 4, А, Б). Это разломы, положение которых, согласно данным большинства исследователей (см. раздел 2.1), определяется углом 55° между осевой линией зоны и осью сжатия (следствие транспрессии), а также углом скалывания, равным $\approx 30^\circ$. После формирования разломов 1-й серии, которыми являются сколы Риделя (R' и R на рис. 4, Б-1), могут образовываться сколы 2-й серии (n' и n на рис. 4, Б-2) или сколы 3-й серии (t' и t на рис. 4, Б-3), соответствующие всем возможным вариантам индексации осей напряжений. Исключение составляет лишь случай переиндексации осей $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{раст}$, реализации которого (и, следовательно, изменению типа подвижек в зоне на противоположный) препятствует действие внешних сил.

Шесть перечисленных выше систем разрывов доминируют в парагенезисе разрывов 2-го порядка, так

как представляют широкую зону ранней стадии развития разлома. После достижения предела прочности в нагруженном объеме начинается процесс локализации деформации, который осуществляется на поздней стадии развития зоны посредством удлинения R -сколов и их сочленения друг с другом за счет формирования P -сколов (рис. 2; 4, А). Интенсивные перемещения по этим разломам обеспечиваются развитием системы нарушений T -типа (рис. 4, А), перпендикулярной к двум упомянутым направлениям разрывов. Нарушения T -типа могут характеризоваться перемещениями противоположных знаков у разных разломов этой системы, поскольку они обеспечивают возможность движения блоков подобно третьей (дополнительной) системе в тройственном парагенезисе трещин. Из R - и P -сколов формируется магистральный разрыв (Y -тип), что свидетельствует о начале стадии полного разрушения, на которой при наличии особых условий трения в качестве опережающих разрывов в большинстве случаев активизируются некоторые из систем опережающих разрывов ранних этапов разломообразования.

Таким образом, с учетом близкого пространственного положения разрывов P - и Y -типов (рис. 4, А), внутреннюю структуру зоны относительно крупного разлома в случае ее полноценного развития, кроме сместителя 1-го порядка (Y -тип), составляют семь систем разломов 2-го порядка: R , R' , n , n' , t , t' и T . Каждому из этих направлений разрывов на уровне трещин соответствует свой парагенезис из трех примерно перпендикулярных систем. С учетом этого на круговой диаграмме рис. 4, В, показано положение полюсов, представляющих полный набор разрывных систем в зоне скалывания разломного типа. Каждую систему образуют трещины, а системы, отмеченные залитыми значками, могут быть представлены как разрывами самого мелкого масштабного ранга, так и разломами.

Парагенезис рис. 4, В, является исходным для составления эталонных трафаретов, используемых в спецкартировании при обработке круговых диаграмм трещиноватости и соответствующих разломным зонам, которые формируются в обстановках сдвига, сжатия и растяжения земной коры. Поскольку сдвиги, взбросы и сбросы в механическом отношении подобны (формируются при скалывании), эталонные наборы разрывных систем для зон их влияния являются членами рассматриваемого парагенезиса, ориентированного в пространстве так, чтобы его положение и характер подвижек по Y -сколам соответствовали правому или левому сдвигу, а также сбросам и взбросам с разными углами падения. Подобный принцип был использован для составления эталонных диаграмм (трафаретов), каждая из которых представляет полный набор разрывных систем для всех основных типов разломных зон [Seminsky, 2003; Seminsky et al., 2005; Seminsky, Burzunova, 2007]: правого и левого сдвигов, взброса с углом падения 55° , надвига с углом падения 15° , сброса с углом падения 75° и сброса с углом па-

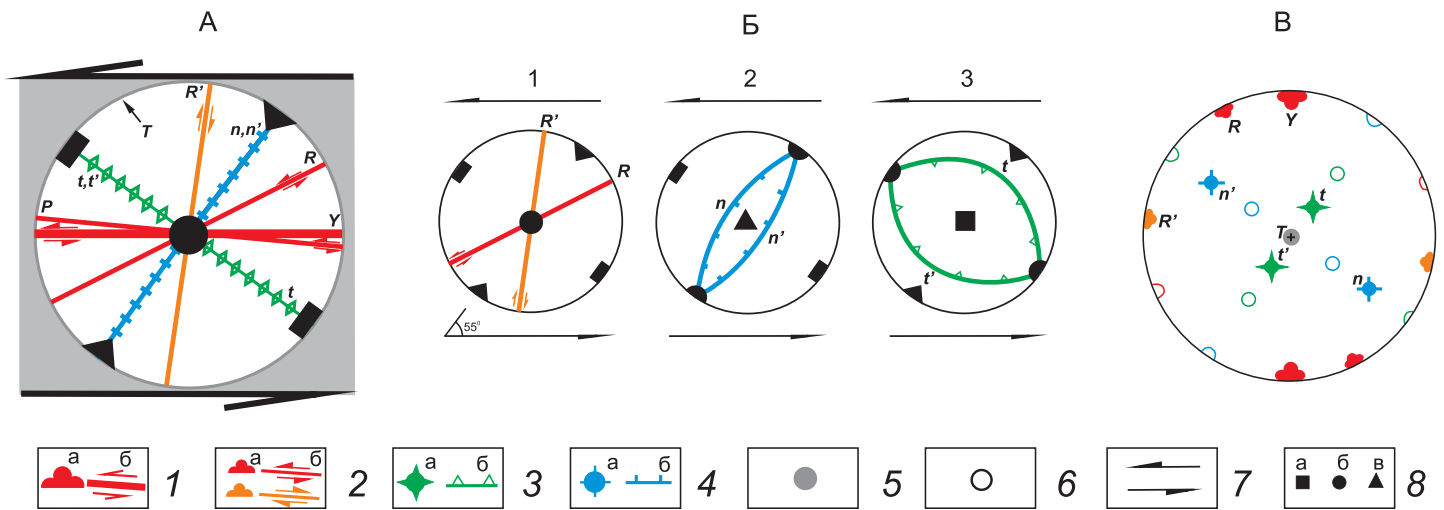


Рис. 4. Парагенезис разрывных систем зоны скальвания, образовавшейся в сдвиговом поле напряжений (на примере лево-го сдвига).

А – сводная диаграмма простираний разрывных систем, формирующихся в зоне скальвания. Б – положение на круговых диаграммах систем сопряженных сколов 1-й (R и R'), 2-й (n и n') и 3-й (t и t') серий, которые могут развиваться за счет переиндексации осей главных нормальных напряжений в ходе разрывообразования. В – круговая диаграмма-трафарет (верхняя полусфера, сетка Вульфа), на которой в полюсах показано эталонное сочетание троек взаимно перпендикулярных систем трещин, соответствующих парагенезису разрывов (залитые значки с латинскими буквами), который имеет место в левосдвиговой зоне скальвания при небольшой транспрессии (угол между сместителем разлома и осью сжатия – 55°). 1 – полюсы (а) и плоскости (б) главного сдвигового сместителя 1-го порядка; 2 – полюсы (а) и плоскости (б) левых и правых сдвигов 2-го порядка; 3 – полюсы (а) и плоскости (б) надвигов (взбросов) 2-го порядка; 4 – полюсы (а) и плоскости (б) сбросов 2-го порядка; 5 – положение полюса разрывов трансформационного типа; 6 – положение полюса второстепенной или дополнительной систем тройственного парагенезиса трещин (цвет знака соответствует цвету главной системы тройственного парагенезиса); 7 – направление перемещения крыльев зоны скальвания; 8 – выходы на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений $\sigma_{расп}$ (а), σ_2 (б) и $\sigma_{сж}$ (в), представленных для поля напряжений 1-го порядка (рис. 4, А) и случаев возникновения сколовых разрывов 1, 2 и 3-й серий (рис. 4, Б) в левосдвиговой зоне.

Fig. 4. A paragenesis of fracture systems in a shear zone that formed in the shear stress field (as exemplified by the left-lateral strike-slip fault).

А – summary diagram of strikes of fracture systems formed in the shear zone. Б – circle diagrams showing positions of systems of conjugated shear faults of the 1st (R and R'), 2nd (n and n') and 3rd (t and t') series that may develop due to re-indexation of main normal stress axes during faulting. В – circle diagram / pattern (upper hemisphere, Wolf net); at the poles, standard sets of triple nearly-perpendicular system of fractures are shown, and they correspond to the paragenesis of fractures (filled symbols with Latin letters) which is present in the left-side shear zone under small transpression (the angle between the fault plane and the compression axes is 55°). Poles (а) and planes (б): 1 – main shear fault of the 1st order; 2 – left- and right-lateral strike-slip faults of the 2nd order; 3 – thrusts (reverse faults) of the 2nd order; 4 – normal faults of the 2nd order; 5 – position of the pole of transform fractures; 6 – position of the pole of the secondary or auxiliary system of the triple paragenesis of fractures (colours as per the main system of the triple paragenesis); 7 – displacement direction of wings of the shear zones; 8 – the upper hemisphere and axes of main normal stresses $\sigma_{расп}$ (а), σ_2 (б) and $\sigma_{сж}$ (в), which are given for the stress field of the 1st order (Fig. 4, А), and cases with occurrence of shear fractures of the 1st, 2nd and 3rd sets (Fig. 4, Б) in the left-lateral strike-slip zone.

дения 35° (рис. 5). Впоследствии трафареты были скорректированы Ю.П. Бурзуновой [Burzunova, 2011] за счет использования разных углов (2α) между парами сколов со сбросовыми ($\approx 75^\circ$), сдвиговыми ($\approx 81^\circ$) и взбросовыми ($\approx 91^\circ$) подвижками (рис. 6) согласно значениям, установленным эмпирическим путем [Seminskii, 1997; Burzunova, 2011]. Это не изменило парагенезисы в качественном отношении (типы и принципиальное положение разрывных систем), но позволило сделать более достоверным результат сопоставления трафарета с конкретной круговой диаграммой трещиноватости.

Кроме отмеченных выше небольших отличий в углах скальвания у сбросов, сдвигов и взбросов, разли-

чие динамических обстановок разрывообразования находит более существенное проявление во внутренней структуре разломных зон (рис. 7). В зонах со смещением крыльев по падению, в отличие от сдвигов, на поздних стадиях разломообразования могут развиваться периферийные (тыловая для взбросов и фронтальная для сбросов) полосы распространения гравитационных разрывов, связанных с опусканием поднятого крыла под действием силы тяжести. Они в целом вызваны формированием и подвижками по магистральному сместителю и поэтому, согласно тектонофизической трактовке, должны относиться к структуре разломной зоны. Набор разрывов в пределах этих подзон аналогичен ранней стадии развития основной зоны

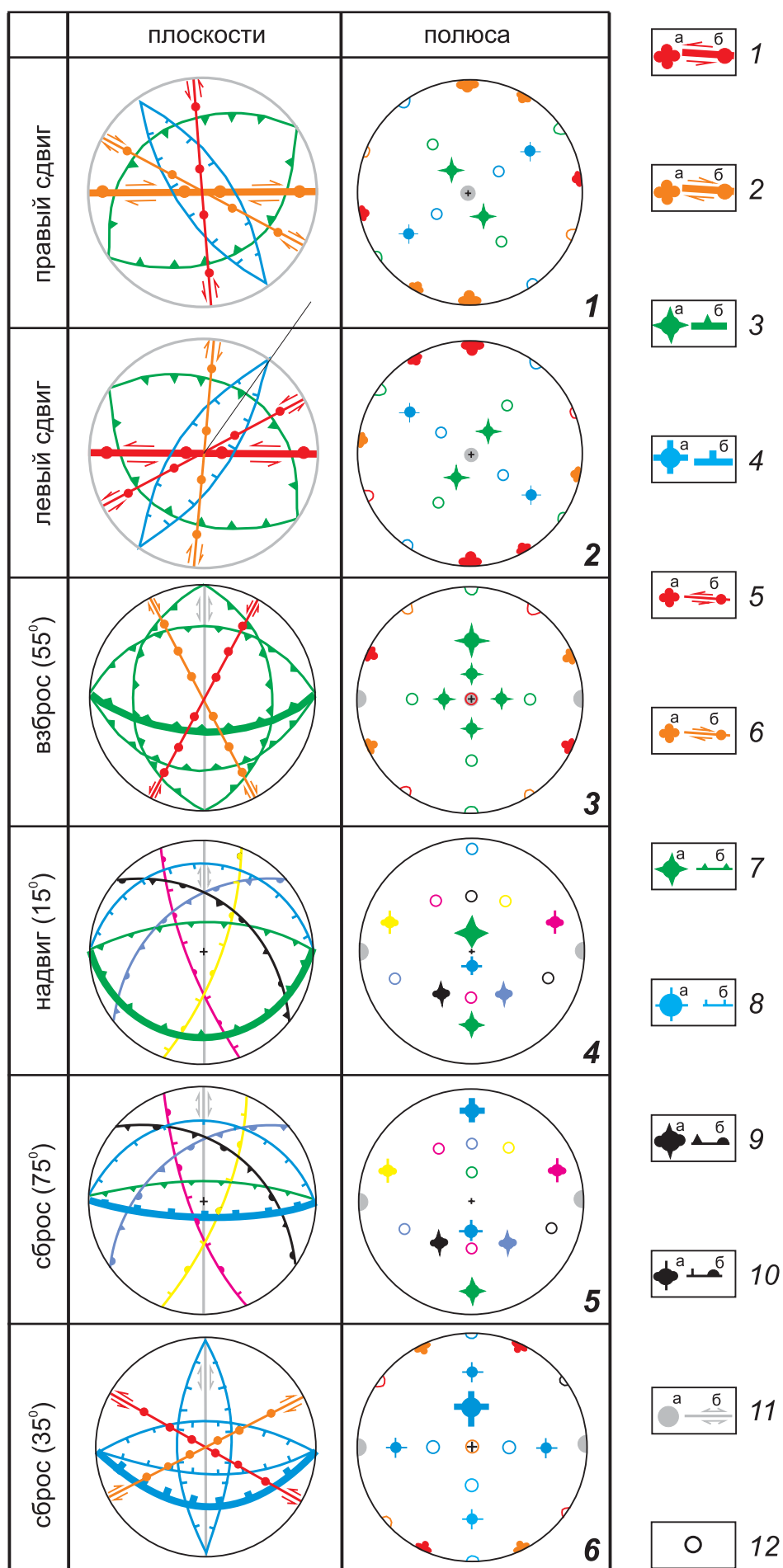


Рис. 5. Эталонные парагенезисы разрывов и соответствующих им троек-систем трещин, имеющие место в зонах взброса (55°) и надвига (15°), крутого (75°) и пологого (35°) сбросов, левого и правого сдвигов.

Парагенезисы представлены на круговых диаграммах (верхняя полусфера, сетка Вульфа) в плоскостях и полюсах для наиболее распространенного случая транспрессивного скалывания (угол между сместителем разлома и осью сжатия – 55°), что позволяет использовать их для интерпретации массовых замеров сложных трещинных сетей. Полюсы вертикальных разрывных систем здесь и на следующем рисунке показаны половинками значков на противоположных сторонах круга. 1 – полюсы (а) и плоскости (б) главного левосдвигового сместителя 1-го порядка; 2 – полюсы (а) и плоскости (б) главного правосдвигового сместителя 1-го порядка; 3 – полюсы (а) и плоскости (б) главного надвигового (взбросового) сместителя 1-го порядка; 4 – полюсы (а) и плоскости (б) главного сбросового сместителя 1-го порядка; 5 – полюсы (а) и плоскости (б) левых сдвигов 2-го порядка; 6 – полюсы (а) и плоскости (б) правых сдвигов 2-го порядка; 7 – полюсы (а) и плоскости (б) надвигов (взбросов) 2-го порядка; 8 – полюсы (а) и плоскости (б) сбросов 2-го порядка; 9 – полюсы (а) и плоскости (б) взбросо-сдвигов 2-го порядка (полюсы соответствующего тройственного парагенезиса показаны одним цветом); 10 – полюсы (а) и плоскости (б) сбросо-сдвигов 2-го порядка (полюсы соответствующего тройственного парагенезиса показаны одним цветом); 11 – полюсы (а) и плоскости (б) трансформационных разрывов 2-го порядка; 12 – положение полюса второстепенной или дополнительной системы тройственного парагенезиса трещин (цвет знака соответствует цвету главной системы тройственного парагенезиса).

Fig. 5. Standard parageneses of fractures and their corresponding triple systems of fractures in zones of reverse fault (55°) and thrust (15°), steeply-dipping (75°) and low-dipping (35°) normal, left- and right-lateral strike-slip faults.

Parageneses are shown in circle diagrams (upper hemisphere, Wolf net) in planes and poles for the most typical case of transpression shear (the angle between the fault plane and the compression axes is 55°), and they can be used for interpretations of mass measurements of complicated fracture patterns. Poles of vertical fracture systems in this figure and the next one are shown by halves of symbols at the opposite sides of the circles. Poles (a) and planes (b): 1 – main left-lateral strike-slip fault of the 1st order; 2 – main right-lateral strike-slip fault of the 1st order; 3 – main thrust (reverse fault) of the 1st order; 4 – normal fault of the 1st order; 5 – left-lateral strike-slip faults of the 2nd order; 6 – right-lateral strike-slip faults of the 2nd order; 7 – thrusts (reverse faults) of the 2nd order; 8 – normal faults of the 2nd order; 9 – strike-slip faults with reverse component of the 2nd order (poles of the corresponding triple paragenesis are shown in same colour); 10 – strike-slip faults with normal component of the 2nd order (poles of the corresponding triple paragenesis are shown in same colour); 11 – transformation faults of the 2nd order; 12 – position of the pole of the 2nd order of auxiliary system of the triple paragenesis of fractures (the symbol's colour corresponds to that of the main system of the triple paragenesis).

(т.е. это три серии сколов), но угловые взаимоотношения различны ввиду кардинального отличия динамических обстановок формирования. Это тыловая полоса растяжения в поднятом крыле зоны взброса (надвига) или фронтальная полоса сжатия в опущенном крыле зоны сброса. В связи с необязательным присутствием гравитационных разрывов в зонах разломов, но существенным усложнением при их учете операций обработки фактического материала, системы этих разрывов не вводятся в состав эталонного парагенезиса. Кроме того, при использовании уже выбранного набора трафаретов (см. рис. 6) полоса распространения гравитационных нарушений ввиду ее обособленного периферийного расположения выделяется отдельной зоной, происхождение которой устанавливается на стадии интерпретации материалов спецкартирования.

Таким образом, тектонофизические закономерности разломообразования в зонах транспрессивного скалывания позволяют использовать в рамках спецкартирования эталонные трафареты, представленные на рис. 6 для лево- и правостороннего сдвигов, а также зон сбросов и взбросов с наиболее часто встречающимися углами падения сместителей. При обработке круговых диаграмм трещин сочетание максимумов их полюсов сопоставляется с набором всех показанных на трафарете систем разрывов. При исследованиях на разломном уровне иерархии учитываются только залитые значки, соответствующие разломам 2-го порядка в зоне дизъюнктива более крупного ранга. На рис. 8 эти парагенезисы представлены для зон сдвига, сброса и взброса без учета углов падения разрывных систем,

так как на данном иерархическом уровне, например, для выделения рангов поля напряжений, достаточно провести менее трудоемкий анализ простираций разрывных систем.

2.3. ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЫВНЫХ СЕТЕЙ

Кроме ориентировки трещин и разломов, являющейся при спецкартировании главным предметом парагенетического анализа, важная часть построений базируется на оценках параметров разрывных сетей, которые отражают, во-первых, интенсивность и длительность деструкции и, во-вторых, условия ее протекания. Первую группу количественных характеристик представляют плотностные, частотные и масштабные показатели: количество разрывов на единицу длины, площади или объема, густота разрывов, их длина, ширина, количество разрывов определенного ранга, количество разрывных систем и пр. Их определение для обнажений горных пород и более крупных объемов земной коры описано в существующих методических рекомендациях по структурной геологии, а также специализированных публикациях, например [Sherman, 1966, 1969; Ratz, Chernyshev, 1970; Chernyshev, 1983; Belousov, 1985; и др.]. Большие значения этих параметров при прочих равных условиях свидетельствуют о более высокой интенсивности процесса разрывообразования. Наиболее часто используемая величина из данной группы показателей – плотность разрывов – может служить мерой деформации породного массива

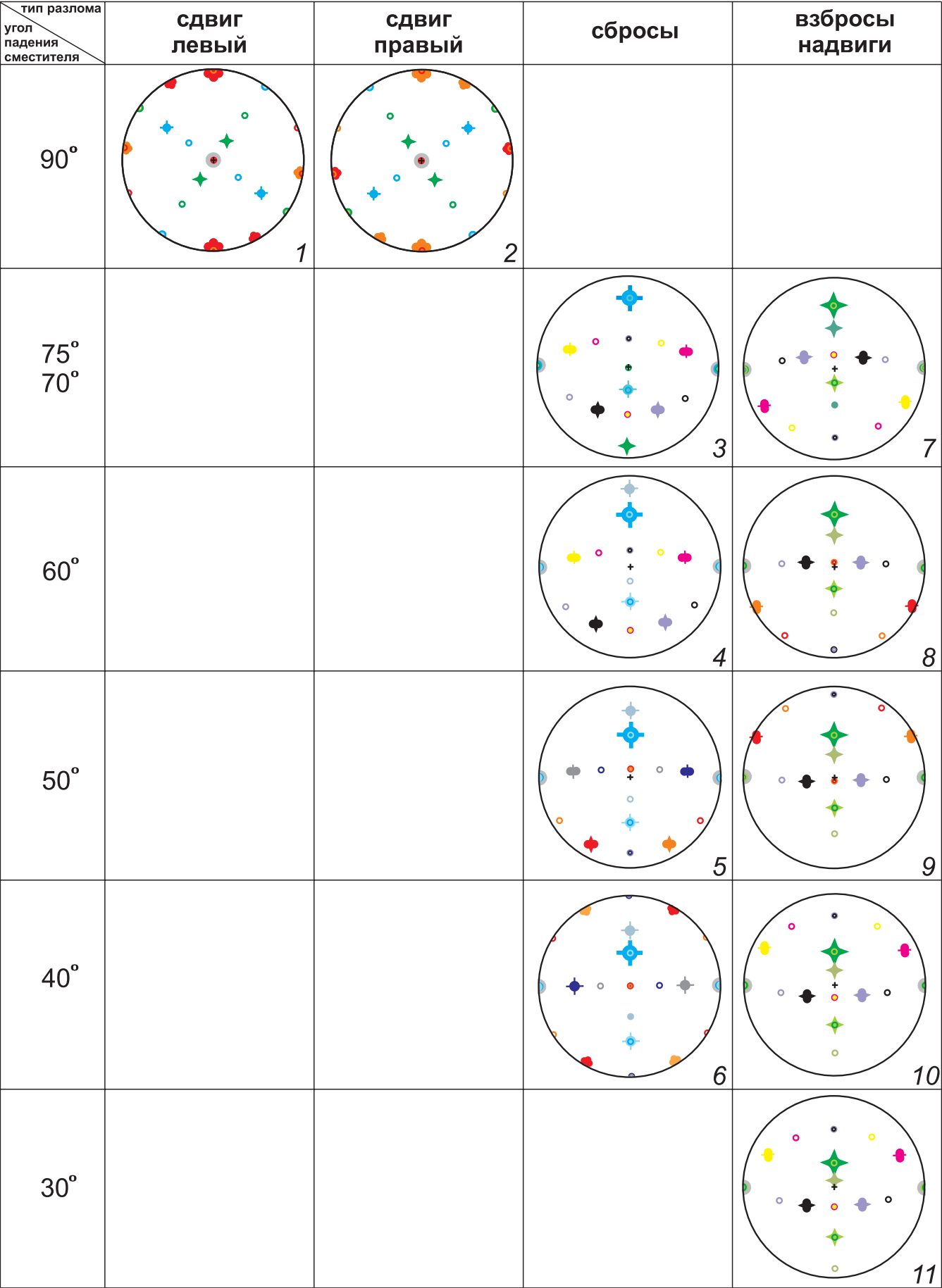


Рис. 6. Трафареты, отражающие положение на круговых диаграммах эталонных парагенезисов разрывов, имеющих место в типовых разломных зонах (по [Burzunova, 2011] с добавлениями).

Парагенезисы представлены в полюсах на круговых диаграммах (верхняя полусфера, сетка Вульфа) для наиболее распространенного случая транспрессионного скалывания (угол между сместителем разлома и осью сжатия – 55°), что позволяет использовать их для интерпретации массовых замеров сложных трещинных сетей. Для каждого парагенезиса на диаграмме одним цветом показаны все три полюса, что в некоторых местах отражается наложением 2–4 разноцветных и разнотипных значков. 1 – полюс левосдвигового сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 2 – полюс правосдвигового сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 3 – полюс взбросового (надвигового) сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 4 – полюс сбросового сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 5 – полюс сбросо-сдвигового сместителя 2-го порядка (полюсы соответствующего тройственного парагенезиса показаны одним цветом); 6 – полюс взбросо(надвиго)-сдвигового сместителя 2-го порядка (полюсы соответствующего тройственного парагенезиса показаны одним цветом); 7 – полюс трансформационного сместителя 2-го порядка; 8 – полюс второстепенной или дополнительной системы тройственного парагенезиса трещин.

Fig. 6. Patterns showing locations (in circle diagrams) of standard parageneses of fractures that are present in typical fault zones (from [Burzunova, 2011] with additions).

Parageneses are shown at poles of circle diagrams (upper hemisphere, Wolf net) for the most common case of transpressional shear (the angle between the fault plane and the compression axis is 55°) which provides for their use for interpreting mass measurements of complicated fracture networks. In the diagrams, one colour is used to show three poles of each parageneses, and two to four symbols of various colours are thus overlapping at some locations. 1 – pole of the left-lateral fault plane of the 1st (a) or 2nd (б) order; 2 – pole of the right-lateral fault plane of the 1st (a) or 2nd (б) order; 3 – pole of the reverse (thrust) fault plane of the 1st (a) and 2nd (б) order; 4 – pole of the normal fault plane of the 1st (a) or 2nd (б) order; 5 – pole of the plane of strike-slip fault with normal component of the 2nd order (poles of corresponding triple paragenesis are shown in the same colour); 6 – pole of the plane of strike-slip fault with reverse (thrust) component of the 2nd order (poles of corresponding triple paragenesis are shown in the same colour); 7 – poles of the transform fault plane of the 2nd order; 8 – pole of the secondary or auxiliary system of triple paragenesis of fractures.

при отсутствии более точных способов ее определения. Если разрывообразование связано с упругой деформацией, то плотность разрывов пропорциональна величине действовавших напряжений [Gzovsky, 1963; Knorring, 1969].

Кроме интенсивности деструкции, показатели рассматриваемой группы косвенно отражают длительность процесса, этапность и относительный возраст формирования разрывной структуры изучаемого участка земной коры. Так, сместитель 1-го порядка, формирующийся в итоге продолжительного процесса структурообразования в разломной зоне, с большей вероятностью принадлежит к системе с высокой плотностью разрывов 2-го порядка и связан с тем парагенезисом, который наиболее часто встречается на изучаемой территории. Наличие большого числа разнотипных парагенезисов свидетельствует о многоэтапности становления структуры изучаемого участка земной коры. Наконец, при прочих равных условиях относительно более молодым по возрасту будет то поле напряжений, в котором формировался парагенезис, встречающийся в регионе наиболее часто.

Вторая группа количественных показателей отражает условия разрывообразования и, как следствие, тесно связана с составом парагенезиса разрывов, рассмотренного в предыдущем разделе. Это угловые соотношения между разрывными системами, на которых здесь акцентируется внимание в связи с важными для картирования следствиями статистического характера информации, получаемой для конкретной природной обстановки. Во-первых, многолетний опыт анализа данных по трещиноватости в геодинамически активных регионах подтвердил наблюдения П.Н. Николаева [Nikolaev, 1992] о существовании закономерных ва-

риаций углов между сопряженными трещинами при образовании их систем в процессе деструкции. Максимумы двух систем сопряженных трещин, выявленных при сопоставлении круговых диаграмм с трафаретами (см. рис. 6), во многих случаях с установленной (по независимым данным) кинематикой разломных зон оказались вытянуты в сторону квадранта с осью относительного растяжения. Таким образом, эту закономерность, несмотря на известную дискуссионность генезиса разбросов, можно использовать как независимый критерий (совпадение положения осей напряжений) правильности выбора трафарета для интерпретации происхождения сети «немых» трещин.

Во-вторых, величина угла между классической парой сопряженных сколовых систем (удвоенный угол скалывания 2α на рис. 1) в однотипных тройственных парагенезисах трещин, выявленных посредством сопоставления круговых диаграмм с эталонными трафаретами, является устойчивой для одинаковых условий деформации. Это позволяет (не забывая об описанных в предыдущем разделе априорных различиях в углах скалывания для обстановок сжатия, растяжения и сдвига) сопоставлять выявленные на изучаемом участке земной коры типы парагенезисов по условиям их структурообразования. Поскольку определяющим параметром условий деформации для угла скалывания является величина всестороннего давления, большие углы между парой сопряженных сколов отражают более глубокие уровни формирования трещин, что косвенно свидетельствует о сравнительно древнем возрасте образования соответствующей разрывной сети.

Отметим, что оценки, полученные по обоим рассмотренным группам количественных характеристик, могут в отдельно взятом случае не отражать действи-

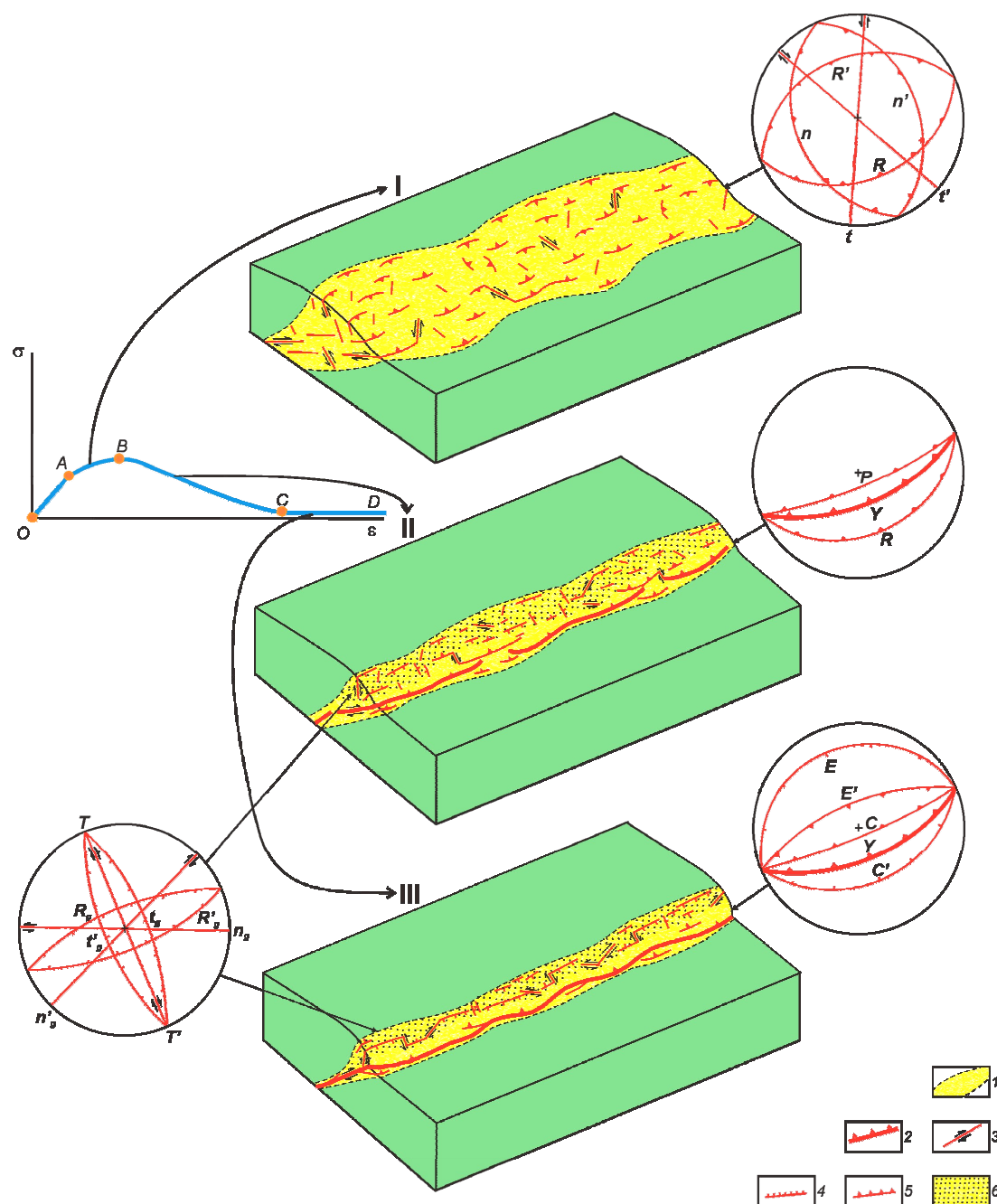


Рис. 7. Круговые и блок-диаграммы, представляющие системы разрывов 2-го порядка, которые имеют место на главных стадиях формирования надвиговой разломной зоны.

Принципиальные схемы строения надвиговой зоны, показанные на блок-диаграммах, соответствуют трем главным дизъюнктивным стадиям ее развития (I – ранняя, II – поздняя, III – стадия полного разрушения) и трем характерным отрезкам кривой «нагрузка (σ) – деформация (ϵ)»: AB – упрочение; BC – ослабление; CD – разрушение. Латинскими буквами на диаграммах показаны разнотипные разрывы 2-го порядка, опережающие (R' , R , n' , n , t' , t и P), оперяющие (на участках сжатия – C' и C ; растяжения – P' и P) и сопутствующие (трансформационные – T ; гравитационные – R'_g , R_g , n'_g , n_g , t'_g и t_g) формированию магистрального сместителя 1-го порядка (Y). 1 – границы разломной зоны; 2 – магистральный сместитель и его наиболее крупные сегменты; 3–5 – разрывы 2-го порядка сдвигового (3), сбросового (4) и взбросового или надвигового (5) типа; 6 – полоса распространения сопутствующих гравитационных разрывов.

Fig. 7. Circle and block diagrams showing systems of fractures of the 2nd order which are present in main stages of formation of a thrust fault zone.

Principal schemes of the thrust zone, which are shown in the block diagrams, correspond to three main stages in development of the zone (I – early, II – late, III – complete destruction) and three typical segments of the 'load (σ) vs deformation (ϵ)' curve; AB – strengthening; BC – weakening; CD – destruction. Latin letters in diagrams show fractures of various types of the 2nd order, which are early (R' , R , n' , n , t' , t and P), feathering (on sites of compression – C' and C , and extension – P' and P) and accompanying (transform – T ; gravity – R'_g , R_g , n'_g , n_g , t'_g and t_g) occur during formation of the main fault plane of the 1st order (Y). 1 – fault zone boundaries; 2 – main fault plane and its largest segments; 3–5 – fractures of the 2nd order of strike-slip (3), normal (4) and reverse or thrust (5) types; 6 – band wherein accompanying gravity fractures are located.

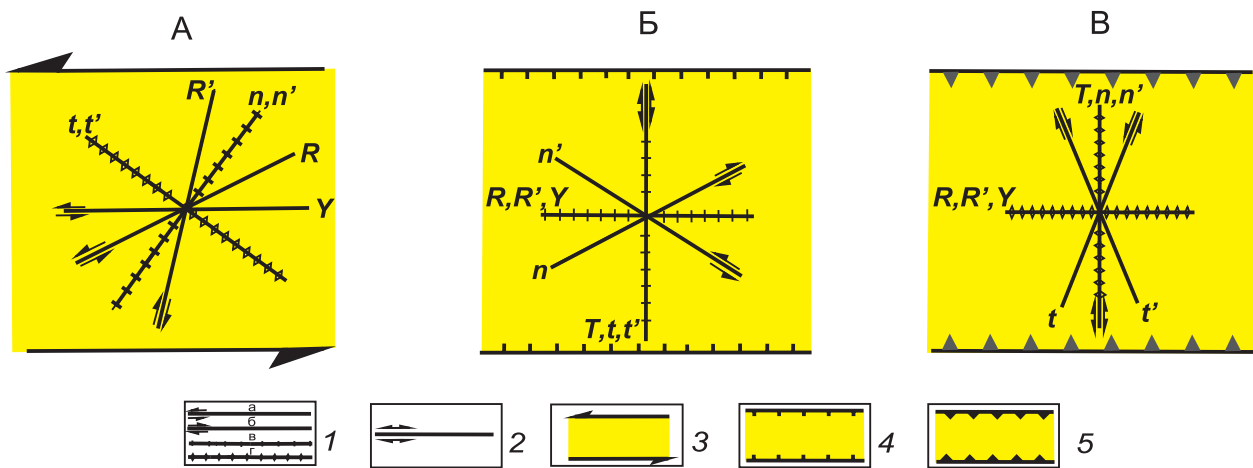


Рис. 8. Парагенезисы разломов 2-го порядка в зоне сдвига (левого), сброса и взброса (надвига), представленные простираниями плоскостей в плане для условий транспрессивного скалывания (угол между сместителем разлома и осью сжатия – 55°).

Латинскими буквами обозначены системы, однотипные в механическом отношении. 1 – плоскости левых сдвигов (а), правых сдвигов (б), сбросов (в) и взбросов (надвигов) (г) 2-го порядка; 2 – плоскости трансформационных сдвигов 2-го порядка (в зоне сдвига совпадают с плоскостью рисунка); 3–5 – зоны левого сдвига (3), сброса (4) и взброса (надвига) (5) 1-го порядка.

Fig. 8. Parageneses of fractures of the 2nd order in zones of left-lateral strike-slip, normal and reverse (thrust) faults, which are represented by plane strikes in plan for conditions of transpressional shear (the angle between the fault plane and the compression axis is 55°).

Latin letters correspond to systems that are similar in terms of mechanics. 1 – planes of left-lateral strike-slip (a), right-lateral strike-slip (б), normal (в) and reverse (thrust) (г) faults of the 2nd order; 2 – planes of transform strike-slip faults of the 2nd order (coincident with the figure's plane in the strike-slip zone); 3–5 – zone of left-lateral strike-slip (3), normal (4) and reverse (thrust) (5) faults of the 1st order.

тельную ситуацию, но приводят к верному результату при анализе большого объема измерений. Именно на этом и базируется спецкартирование, главные принципы которого рассмотрены в следующем разделе статьи.

3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРЫВНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ СПЕЦКАРТИРОВАНИЯ

Содержание спецкартирования по большому счету не отличается от методов, в основе которых лежит парагенетический анализ. Вначале на изучаемой территории в соответствующем масштабе организуется сеть пунктов, в каждом из которых делается массовый замер элементов залегания трещин и другие наблюдения, способствующие решению задач структурного картирования. Далее по стандартной методике для каждого пункта наблюдений с использованием компьютерных программ отстраиваются диаграммы трещиноватости, которые затем сопоставляются с трафаретами, отражающими идеализированные трещинные сети в разломных зонах разного морфогенетического типа (см. рис. 6). Полученные в результате данной операции решения о присутствии в пункте наблюдения разломной зоны определенного типа и пространственной

ориентировки выносятся в соответствующем месте на схему территории, после чего по точкам с однотипными парагенезисами фиксируется положение разломных зон. Для подтверждения достоверности картирования на данном этапе особенно важна априорная информация о наличии сместителей, кинематике и возрасте перемещений по разрывам, полученная в отдельных коренных выходах и переносимая на всю пространственно связанную с ними зону распространения однотипного структурного парагенезиса.

Кроме составленной таким способом схемы разломной структуры параллельно устанавливаются типы полей напряжений, в которых на отдельных этапах формировались или активизировались ее отдельные элементы. Для этого проводится поранговый анализ выделенных разломных зон, на первом этапе которого все полученные в ходе первоначального анализа локальные решения об их присутствии в отдельных пунктах наблюдения сопоставляются по типу и ориентации с членами каждого из идеализированных парагенезисов разломов (рис. 8). Выявленные в итоге данной процедуры решения о наличии разнотипных разломных зон более крупного ранга соответствуют региональному уровню поля напряжений, существовавшему в истории развития изучаемого участка земной коры. Далее эти решения используются в качестве основы для следующей итерации с идеализированными

парагенезисами разломов, пока не будет исчерпана возможность объединения разломных зон в рамках сетей, соответствующих определенному полю напряжений. Несколько (обычно 3-4) оставшихся решений об ориентировке разломной зоны и динамической обстановке ее формирования отражают самый низкий (региональный или геоструктурный) уровень процесса деструкции в регионе. Они не могут развиваться в одно время и, таким образом, соответствуют разным этапам разломообразования, проявившимся на изучаемой территории. Далее эти этапы располагаются в последовательности, отражающей относительный возраст их проявления в зависимости от оценок, сделанных по косвенным (статистическая информация о частоте встречаемости и угловых соотношениях разрывных систем) или прямым (априорная информация) признакам. В заключение спецкартирования обратным ходом осуществляется составление схем разломных зон для каждого их главных этапов формирования структуры. Для этого из общей сети выделяются те дизъюнктивы, которые возникли или активизировались в соответствующем поле напряжений.

В соответствии со спецификой предмета (трещины без признаков смещений), объекта (разломные зоны) и вида (картирование) исследований предлагаемый метод базируется на серии принципиальных положений, обеспечивающих эффективность его использования в регионах со сложной историей тектонического развития.

3.1. Главным принципом при сборе полевой информации является единообразие наблюдений в каждом пункте картирования, реализация которого позволяет значительно снизить затраты времени на сбор и обработку основной массы фактического материала. Данный принцип относится к основным операциям метода (массовый замер трещин, построение диаграмм, их сопоставление с трафаретами и др.), но не исключает привлечения дополнительной структурной информации, которая не имеет массового распространения, но важна для интерпретации как априорная. Например, в процессе сбора фактического материала это вся структурная информация, которая, кроме массового замера трещин, может быть получена при документировании коренного выхода, а при интерпретации – материалы предшественников о разломной тектонике и этапам деформации изучаемого участка земной коры.

3.2. Статистический характер – еще одна отличительная особенность спецкартирования, заключающаяся в массовых измерениях трещин и анализе данных на количественном уровне. Использование этого принципа позволяет производить объективные оценки, повышая достоверность результатов картирования за счет привлечения достаточной статистики измерений и применения гибкой системы абсолютных и относительных показателей. Так, сопоставление величин плотности разрывов или количества систем является обоснованной причиной решения о доминировании

определенного парагенезиса или поля напряжений в процессе деструкции изучаемого участка земной коры. Примером эффективного относительного показателя является плотность полюсов трещин на структурных диаграммах (в %), позволяющая сравнивать коренные выходы с разным количеством измерений или представленные породами с разной компетентностью по отношению к разрывообразованию. Наконец, статистический характер наблюдений при спецкартировании дает возможность отсеивать и далее не анализировать точки, замеры и пр., существенно отличающиеся от других подобных объектов по типу, обособленности положения и редкой встречаемости, как ошибочные или малозначимые в строении изучаемого региона.

3.3. Высокая степень формализации основных операций – еще один принцип спецкартирования, который позволяет проводить работы исполнителям со стандартным геологическим образованием. Профессиональные знания необходимы главным образом при интерпретации материалов картирования, тогда как сбор фактического материала может осуществляться исполнителями, обладающими минимальными навыками работы полевого геолога. При стандартной ситуации наиболее важным моментом на этом этапе является способность оценить степень структурно-вещественной неоднородности коренного выхода и, как следствие, провести массовые замеры трещин отдельно в разных типах пород или на участках с отличающимся типом трещинной сети (системная, полигональная, сфероидальная и др.). Последнее, наряду с использованием относительных показателей плотности трещин, позволяет снизить до минимума влияние вещественных неоднородностей при выделении разломных зон методом спецкартирования. То же касается влияния разрывных сетей нетектонического происхождения, поскольку первичные или техногенные трещины в областях активной деструкции имеют локальное распространение и хорошо визуально диагностируются, а системные сети, как правило, связаны с воздействием внешних сил (даже в слабосцементированных отложениях), характер которых может быть установлен при интерпретации результатов спецкартирования.

3.4. Использование технических средств сбора и обработки информации является неременной особенностью спецкартирования, обеспечивающей достоверность и точность получаемого результата при экономии времени на обработку, особенно актуальной при статистическом характере измеряемого и анализируемого материала. Известные геоинформационные системы, предназначенные для анализа и отображения информации в пространственных координатах, могут широко применяться на этапе составления схем разломных зон. На этапе первичной обработки массовых замеров необходимо использовать какую-либо из существующих программ анализа геолого-структурных данных, позволяющую отстраивать круговые диаграммы трещиноватости с разными величинами окна

осреднения и уровнями изолиний плотности. В последнее время появилась возможность автоматизировать процесс массового замера элементов залегания трещин (перевод замера в электронный вид), занимающий большую часть времени работы на точке наблюдения. Вместо электронных геологических компасов, не получивших по разным причинам широкого применения в геологической практике, в этом качестве могут быть использованы общедоступные в настоящее время смартфоны (с соответствующим программным приложением), позволяющие быстро измерять и фиксировать в файле памяти элементы залегания трещин, координаты пункта наблюдений и другую необходимую информацию. Это в несколько раз сокращает время сбора информации, а также позволяет при наличии портативного компьютера проводить первичный анализ трещиноватости непосредственно на участке исследований.

3.5. Парагенетический принцип составляет суть пространственного аспекта спецкартирования и в этом качестве представлен в предыдущих разделах статьи. Следствием его использования является объединение пунктов с однотипными разрывными парагенезисами, что позволяет выделить на местности границы разломных зон или участков воздействия сил нетектонической природы. Здесь необходимо акцентировать внимание на его эффективности в плане решения одного из наиболее сложных вопросов изучения «немых» трещин – определении возраста формирования их сетей. Заложенный в основу картирования, этот принцип позволяет переносить возрастную оценку трещинного или разломного парагенезиса с пункта ее достоверного определения (например, нарушение датированных комплексов) на все участки распространения данного набора разрывных систем или, по крайней мере, те из них, которые образуют в пространстве единую зону. Аналогичным образом осуществляется использование и другой априорной информации.

3.6. Эволюционный принцип составляет основу временного аспекта спецкартирования и важен в двух отношениях, являющихся следствием двуединого (непрерывно-прерывистого) характера развития разрывной структуры земной коры. Во-первых, сеть разрывов в породном массиве формируется в разных по типу полях напряжений, между этапами воздействия которых имеют место периоды полного или частичного затухания процесса деструкции. Формирование разнотипных наборов разрывных систем происходит под действием разнонаправленных внешних сил на отдельных временных этапах деформации, а также в рамках единого цикла активизации вследствие переиндексации осей напряжений в одном поле напряжений 1-го порядка. Таким образом, в регионах с многоэтапной активизацией деструктивного процесса любой сравнительно небольшой объем земной коры (в узком смысле – обнажение горных пород) принадлежит зонам влияния одного или, в случае неоднoактных де-

формаций, нескольких разломов в их широком понимании, что и предопределяет эффективность спецкартирования. Во-вторых, в течение единого деформационного этапа эволюция разломной зоны происходит путем непрерывного увеличения размеров разрывных структур (2-го порядка) за счет постепенного прорастания, а затем объединения друг с другом с образованием структуры более крупного масштабного ранга (1-го порядка). В качественном отношении процесс подобен на разных уровнях иерархии, что используется в спецкартировании для выявления рангов полей напряжений и разломных зон. Парагенетический анализ каждой из пространственно разобщенных сетей мелких разрывов позволяет выделить структуру 1-го порядка; совокупность этих структур используется в качестве основы следующей аналогичной итерации и так далее вплоть до выявления таких структурных элементов, которые не объединяются в рамках одного парагенезиса, поскольку формировались на разных временных этапах деструкции породного массива.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические основы и принципы спецкартирования, рассмотренные в статье, свидетельствуют о том, что метод способен решать сложные проблемы анализа «немой» трещиноватости, каждая из которых на первый взгляд кажется труднопреодолимой, а вся их совокупность формирует представление о, казалось бы, бесперспективности проведения исследований в данном направлении.

Так, вопрос происхождения внешне сложной, даже хаотичной во многих коренных выходах трещинной сети решается посредством вычленения из ее состава сравнительно простых парагенезисов, формирующихся в зоне скалывания при вполне определенном внешнем воздействии (пункт 3.5). Этот же парагенетический принцип является главным в плане снижения осложняющего влияния на результаты съемки структурных и вещественных неоднородностей, причем надежное решение данной проблемы при спецкартировании дополнительно обеспечивается за счет использования относительных показателей (проценты для плотности полюсов трещин на диаграммах и др.), а также выделения и последующего отдельного изучения объектов с явно «аномальными» свойствами (пункты 3.2, 3.3 и 3.5). Проблема определения абсолютного возраста разрывов без признаков смещений преодолевается при спецкартировании посредством надления всей однотипной совокупности разрывных систем, т.е. парагенезиса, временем формирования, достоверно установленным для ее отдельного представителя (пункт 3.5). Даже при отсутствии таких уникальных сведений о возрасте в ходе спецкартирования для разнотипных парагенезисов определяются относительные возрастные соотношения, установление которых осуществ-

ляется путем сравнения серии косвенных показателей (интенсивность разрывных систем, массовость проявления в регионе, величина угла скалывания и др.) и обосновывается статистическим характером проведенных оценок (пункт 3.2). Проблема узкой локальности исследования, связанная с получением основной информации на уровне трещин, преодолевается за счет принципа массовости точечных наблюдений на всей изучаемой площади, а затем обработки этих данных в серии последовательных операций перехода от разрывов 2-го порядка (трещин) к разрывам 1-го (мелкий разлом) и выхода на структуры все более и более крупного масштабного ранга (пункты 3.2 и 3.6). Наконец, проблема трудо- и времяемкости работы с данными массовых наблюдений за трещиноватостью успешно решается за счет единообразия сравнительно простых измерений в поле, формализации основных

операций обработки, а также применения на всех этапах спецкартирования технических и программных средств, которые в настоящее время широко доступны для использования (пункты 3.1, 3.2 и 3.4).

Возможность получить формализованное решение в рамках каждой из перечисленных проблем исследования сложнопостроенных сетей мелких разрывов без признаков смещения выводит спецкартирование в ряд эффективных методик изучения структуры земной коры, которые могут быть реализованы в районах со слабой обнаженностью горных пород. В следующей статье (№ 2) планируется на примерах и поэтапно представить главные операции практической реализации метода, что позволит применять его без специальной подготовки для картирования разломной структуры земной коры и реконструкции динамических обстановок ее формирования.

5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Agosta F., Alessandroni M., Antonellini M., Tondi E., Giorgioni M., 2010. From fractures to flow: A field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics* 490 (3–4), 197–213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.005>.
- Anderson E.M., 1951. The Dynamics of Faulting. Edinburg, 206 p.
- Angelier J., 1989. From orientation to magnitudes in paleostress determination using fault slip data. *Journal of Structural Geology* 11 (1–2), 37–50. [http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90034-5](http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5).
- Belousov V.V., 1985. Foundations of Structural Geology. Nedra, Moscow, 207 p. (in Russian) [Белоусов В.В. Основы структурной геологии. М.: Недра, 1985. 207 с.].
- Billi A., Salvini F., Storti F., 2003. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology* 25 (11), 1779–1794. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00037-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00037-3).
- Bondarenko P.M., 1976. Modeling of Thrust Faults in Folded Areas (Case of Aktash Structures of Gorny Altai). Nauka, Novosibirsk, 123 p. (in Russian) [Бондаренко П.М. Моделирование надвиговых дислокаций в складчатых областях (на примере Акташских структур горного Алтая). Новосибирск: Наука, 1976. 123 с.].
- Burtman V.S., Luk'yanov A.V., Peive A.V., et al., 1963. Horizontal displacement along faults and some methods of their studies. In: Faults and horizontal crustal movements. Publishing House of the USSR Acad. Sci., Moscow, p. 5–33 (in Russian) [Буртман В.С., Лукьянов А.В., Пейве А.В. и др. Горизонтальные перемещения по разломам и некоторые методы их изучения // Разломы и горизонтальные движения земной коры. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 5–33].
- Burzunova Yu.P., 2011. Angles between conjugated systems of near-fault fractures in idealized and natural parageneses formed in various dynamic settings. *Litosfera* (2), 94–110 (in Russian) [Бурзунова Ю.П. Углы между сопряженными системами приразломных трещин в идеализированных и природных парагенезисах, формирующихся в различных динамических обстановках // Литосфера. 2011. № 2. С. 94–110].
- Caine J.S., Bruhn R.L., Forster C.B., 2010. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada. *Journal of Structural Geology* 32 (11), 1576–1589. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2010.03.004>.
- Cassas S.A.M., Gil P.I., Simon G.J.L., 1990. Los metodos de analisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: sistematica y tecnicas de aplicacion. *Estudios Geológicos* 46 (5–6), 385–398.
- Cello G., Gambini R., Mazzoli S., Read A., Tondi E., Zucconi V., 2000. Fault zone characteristics and scaling properties of the Val d'Agri Fault System (Southern Apennines, Italy). *Journal of Geodynamics* 29 (3–5), 293–307. [http://dx.doi.org/10.1016/S0264-3707\(99\)00043-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0264-3707(99)00043-5).
- Chernyshev S.N., 1983. Rock Fractures. Nauka, Moscow, 240 p. (in Russian) [Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.].
- Danilovich V.N., 1961. The Method of Belts in Studies of Fracturing Related to Fault Displacements. IPI, Irkutsk, 47 p. (in Russian) [Данилович В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. Иркутск: ИПИ, 1961. 47 с.].
- Friedman M., Stearns D.W., 1971. Relations between stresses inferred from calcite twin lamellae and macrofractures, Teton Anticline, Montana. *Geological Society of America Bulletin* 82 (11), 3151–3162. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82).

- Gephart J.W., 1990. Stress and the direction of slip on fault planes. *Tectonics* 9, 845–858. <http://dx.doi.org/10.1029/TC009i004p00845>.
- Gibbs A.D., 1990. Linked fault families in basin formation. *Journal of Structural Geology* 12 (5–6), 795–803. [http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141\(90\)90090-L](http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(90)90090-L).
- Gintov O.B., Isai V.M., 1988. Tectonophysical Studies of Faults in Consolidated Crust. Naukova Dumka, Kiev, 228 p. (in Russian) [Гинтов О.Б., Исai В.М. Тектонофизические исследования разломов консолидированной коры. Киев: Наукова думка, 1988. 228 с.].
- Guerriero V., Iannace A., Mazzoli S., Parente M., Vitale S., Giorgioni M., 2010. Quantifying uncertainties in multi-scale studies of fractured reservoir analogues: Implemented statistical analysis of scan line data from carbonate rocks. *Journal of Structural Geology* 32 (9), 1271–1278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2009.04.016>.
- Guiraud M., Laborde O., Philip H., 1989. Characterization of various types of deformation and their corresponding deviatoric stress tensors using microfault analysis. *Tectonophysics* 170 (3–4), 289–316. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90277-1](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(89)90277-1).
- Gushchenko O.I., 1979. The method of kinematic analysis of destruction structures in reconstruction of tectonic stress fields. In: Stress fields and deformations in the lithosphere. Nauka, Moscow, p. 7–35 (in Russian) [Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–35].
- Gzovsky M.V., 1963. Main Issues of Tectonophysics and Tectonics of the Baidzhansai Anticlinorium. Parts 3 and 4. Publishing House of the USSR Acad. Sci., Moscow, 544 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. 3, 4. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 544 с.].
- Hancock P.L., 1985. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology* 7 (3–4), 437–457. [http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3).
- Harding T.P., 1974. Petroleum traps associated with wrench faults. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 58 (7), 1290–1304.
- Kearey P. (Ed.), 1993. The Encyclopedia of the Solid Earth Sciences. Backwell Sci. Pub., Oxford, 713 p.
- Knorring L.D., 1969. Mathematical Methods in Studies of Tectonic Fracturing Mechanism. Nedra, Leningrad, 87 p. (in Russian) [Кнорринг Л.Д. Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости. Л.: Недра, 1969. 87 с.].
- Kopp M.L., 1997. Structure of Lateral Extrusion in the Alpine-Himalayan Collisional Belt. Nauchny Mir, Moscow, 314 p. (in Russian) [Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизиином поясе. М.: Научный мир, 1997. 314 с.].
- Kumpan A.S. (Ed.), 1978. Geological Survey Manual, Scale 1: 50,000. V. 1. Nedra, Leningrad, 128 p. (in Russian) [Методическое руководство по геологической съемке масштаба 1:50000. Т. 1 / Под ред. А.С. Кумпана. Л.: Недра, 1978. 128 с.].
- Luk'yanov A.V., 1965. Structural Manifestation of Horizontal Crustal Movements. Nauka, Moscow, 210 p. (in Russian) [Лукьянов А.В. Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М.: Наука, 1965. 210 с.].
- Luk'yanov A.V., 1991. Plastic Deformations and Tectonic Flow in the Lithosphere. Nauka, Moscow, 144 p. (in Russian) [Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М.: Наука, 1991. 144 с.].
- Mandl G., 1988. Mechanics of tectonic faulting: Models and basic concepts. Elsevier, Amsterdam, 407 p.
- McClay K.R. (Ed.), 1991. Thrust Tectonics. Chapman and Hall, London, 444 p.
- Mikhailov A.E., 1984. Structural Geology and Geological Mapping. Nedra, Moscow, 464 p. (in Russian) [Михайлов А.Е. Структурная геология и геологическое картирование. М.: Недра, 1984. 464 с.].
- Nicolas A. 1987. *Principles of Rock Deformation*. Springer, 208 p.
- Nikolaev P.N., 1992. The Method of Tectonodynamic Analysis. Nedra, Moscow, 295 p. (in Russian) [Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.].
- Parfenov V.D., 1984. About the method of tectonophysical analysis of geological structures. *Geotektonika* (1), 60–72 (in Russian) [Парфенов В.Д. К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. № 1. С. 60–72].
- Park R.G., 1997. Foundations of structural geology. Chapman & Hall, London, 202 p.
- Ramsay J.C., Huber M.J., 1987. The Techniques of Modern Structural Geology. Academ. Pres. Incorp., London, 1 (2), 700 p.
- Rastvetaev L.M., 1987. The paragenetic method of structural analysis of tectonic faults. In: Problems of Structural Geology and Physics of Tectonic Processes. Part 2. GIN, USSR Acad. Sci., Moscow, p. 173–235 (in Russian) [Растветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. М.: ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235].
- Ratz M.V., Chernyshev S.N., 1970. Fracturing and Properties of Fractured Rocks. Nedra, Moscow, 164 p. (in Russian) [Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.].

- Rebetsky Yu.L., 2007. Tectonic Stresses and Strength of Natural Rock Massives. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.].
- Reches Z., 1978. Analysis of faulting in three-dimensional strain field. *Tectonophysics* 47 (1–2), 109–129. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(78\)90154-3](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(78)90154-3).
- Reches Z., 1987. Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb field criterion. *Tectonics* 6 (6), 849–861. <http://dx.doi.org/10.1029/TC006i006p00849>.
- Rodygain A.M., 1991. Indicators of Displacement Directions due to Shear Deformation. Publishing House of Tomsk University, Tomsk, 99 p. (in Russian) [Родыгин А.М. Признаки направления смещения при деформации сдвига. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1991. 99 с.].
- Ruzhich V.V., 1997. Seismotectonic Destruction of the Crust in the Baikal Rift Zone. Nauka, Novosibirsk, 145 p. (in Russian) [Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1997. 145 с.].
- Schulz S.E., Evans J.P., 2000. Mesoscopic structure of the Punchbowl Fault, Southern California and the geologic and geophysical structure of active strike-slip faults. *Journal of Structural Geology* 22 (7), 913–930. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00019-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00019-5).
- Seminskii K.Zh., 1997. Angle relationships between conjugate joint systems near strike-slip, normal, and thrust fault planes. *Doklady Earth Sciences* 354 (4), 531–533.
- Seminsky K.Zh., 1994. Principles and stages of specialized mapping of the fault-block structure based on studies of fracturing. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (9), 112–130 (in Russian) [Семинский К.Ж. Принципы и этапы специализированного разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // *Геология и геофизика*. 1994. № 9. С. 112–130].
- Seminsky K.Zh., 2003. The Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. Geo Branch, Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 243 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 243 с.].
- Seminsky K.Zh., 2005. Mapping of the fault-block structure of the crust at the current level of development of Tectonophysics. *Geofizicheskiy Zhurnal* 27 (1), 85–96 (in Russian) [Семинский К.Ж. Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // *Геофизический журнал*. 2005. Т. 27. № 1. С. 85–96].
- Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P., 2007. Interpretation of chaotic jointing near fault planes: a new approach. *Russian Geology and Geophysics* 48 (3), 257–266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2007.02.009>.
- Seminsky K.Zh., Cheremnykh A.V., 2011. Jointing patterns and stress tensors in Cenozoic sediments of the Baikal rift: development of the structural-genetic approach. *Russian Geology and Geophysics* 52 (3), 353–367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.008>.
- Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A., 2005. The Internal Structure of Continental Fault Zones. Application Aspect. Geo Branch, Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 293 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2005. 293 с.].
- Sherman S.I., 1966. About a new type of maps of tectonic fracturing. *Geotektonika* (3), 141–143 (in Russian) [Шерман С.И. О новом типе карт тектонической трещиноватости // *Геотектоника*. 1966. № 3. С. 141–143].
- Sherman S.I., 1969. Mapping of fracture displacements in ore fields with reference to changes of tectonic fracturing intensity. In: Endogenic mineralization of Pribaikalie. Nauka, Moscow, p. 152–156 (in Russian) [Шерман С.И. Картирование разрывных смещений рудных полей по изменению интенсивности тектонической трещиноватости // *Эндеогенное оруденение Прибайкалья*. М.: Наука, 1969. С. 152–156].
- Sherman S.I., 1977. Physical Regularities of Crustal Faulting. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.].
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modeling Results). Nauka, Novosibirsk, 110 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 110 с.].
- Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I., 1989. Fields of Crustal Stresses and Geological and Geophysical Methods of Their Studies. Nauka, Novosibirsk, 158 p. (in Russian) [Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.].
- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A. et al., 1991. Faulting in the Lithosphere. Strike-Slip Zones. Nauka, Novosibirsk, 262 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 262 с.].
- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A. et al., 1992. Faulting in the Lithosphere. Extension Zones. Nauka, Novosibirsk, 228 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992. 228 с.].

- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A. et al., 1994. Faulting in the Lithosphere. Compression Zones. Nauka, Novosibirsk, 263 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сжатия. Новосибирск: Наука, 1994. 263 с.].
- Sibson R.H., 1998. Brittle failure mode plots for compressional and extensional tectonic regimes. *Journal of Structural Geology* 20 (5), 655–660. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(98\)00116-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(98)00116-3).
- Sim L.A., 1991. Studies of tectonic stresses on the basis of geological indicators (methods, results, and recommendation). *Izvestia vuzov. Geologiya i Razvedka* (10), 3–22 (in Russian) [Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22].
- Smekhov E.M. (Ed.), 1969. The Method of Studies of Rock Fracturing and Oil and Gas Reservoirs in Fractures. Nedra, Leningrad, 129 p. (in Russian) [Методика изучения трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа / Под ред. Е.М. Смехова. Л.: Недра, 1969. 129 с.].
- Stoyanov S., 1977. Mechanism of Fault Zone Formation. Nedra, Moscow, 144 p. (in Russian) [Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.].
- Structural Parageneses and Their Ensembles*, 1997. GEOS, Moscow, 282 p. (in Russian) [Структурные парагенезы и их ансамбли. М.: ГЕОС, 1997. 282 с.].
- Sylvester A.G. (Ed.), 1984. Wrench Fault Tectonics. Tulsa, Oklahoma, USA, 313 p.
- Sylvester A.G., 1988. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin* 100 (11), 1666–1703. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1666:SSF>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2).
- Trifonov V.G., 1983. The Late Quaternary Tectogenesis. Nauka, Moscow, 224 p. (in Russian) [Трифонов В.Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983. 224 с.].
- Trifonov V.G., 1999. Neotectonics of Eurasia. Nauchny Mir, Moscow, 252 p. (in Russian) [Трифонов В.Г. Неотектоника Евразии. М.: Научный мир, 1999. 252 с.].
- Twiss R.J., Moores E.M., 1992. Structural Geology. W.H. Freeman and Company, New York, 533 p.
- Utkin V.P., 1980. Shear Dislocations and Methods of Their Studies. Nauka, Moscow, 144 p. (in Russian) [Уткин В.П. Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука, 1980. 144 с.].



Семинский Константин Жанович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией тектонофизики
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: 8(3952)423027; ✉ e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Seminsky, Konstantin Zh., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Tectonophysics
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: 8(3952)423027; ✉ e-mail: seminsky@crust.irk.ru